

福 井 大 学 審 査
学位論文[博士(工学)]

容積形ポンプの内部流動
の可視化に関する研究

2007年3月

伊 東 哲 也

目次

第1章 序論	1
1.1 まえがき	1
1.2 従来までの研究について	2
1.3 本研究の目的と概要	2
第2章 トロコイドギヤポンプ	4
2.1 緒言	4
2.2 ポンプの分類	4
2.3 トロコイドギヤポンプの形状と特徴	6
2.4 本研究の可視化モデル	8
第3章 可視化トレーサ	15
3.1 緒言	15
3.2 可視化トレーサの選定	15
3.2.1 予備実験	15
3.2.2 カリロスコープ粒子について	16
3.2.3 カリロスコープ粒子とアルミ粉末との比較	17
3.3 トーショナルクエット流を用いた可視化	18
3.3.1 トーショナルクエット流の主せん断ひずみ速度方向の計算	18
3.3.2 実験による画像輝度分布の計測	20
3.3.3 せん断流におけるカリロスコープ粒子の特性に関する考察	21
3.4 結言	22
第4章 カリロスコープ粒子を用いたポンプ内部流動の可視化	30
4.1 緒言	30
4.2 カリロスコープ粒子の可視化実験	30
4.2.1 実験装置および実験条件	30
4.2.2 実験結果	31
4.3 画像解析による統計量分析	33

4.3.1 画像輝度値の分岐線	33
4.3.2 画像輝度分布の位相統計	33
4.4 結言	36
第5章 トロコイドギヤポンプの性能改善検討	53
5.1 緒言	53
5.2 小形トロコイドギヤポンプの製作	53
5.2.1 ポンプの構成	53
5.2.2 ポンプの性能	54
5.3 スラスト動圧溝の効果	56
5.3.1 発生圧力	56
5.3.2 スパイラル軸受の計算結果	56
5.4 結言	57
第6章 結論	64
参考文献	66
謝辞	69

第 1 章

序 論

1.1 まえがき

流体を輸送する小形で、吐出圧が高く、高効率のポンプ (pump) が必要とされている。この要求に対して、構造が簡単で、小形化が期待でき、さらに高寿命で信頼性の高いトロコイドギヤポンプに注目した^{[1]~[6]}。

同ポンプは、容積形のポンプで、トロコイド形状の歯形を持つ内接歯車式の回転ポンプである。内外 2 つの歯車が接触して密閉室を構成するため発生する圧力が高く、また その密閉室は滑らかに移動し、流体が連続的に輸送されることから、他の容積形ポンプに比べて流量の脈動が極めて小さいなどの特徴を持つ。現在、内燃機関で潤滑油を機関内に送り出す用途などに用いられているが、それほど普及していない。一定流量の吐出と無脈動を同時に実現するなど、他のポンプでは実現できない特殊な性質を持つポンプであるが、部品の形が特殊であることなどが、普及を妨げる要因と考えられる。しかし、部品点数が少なく構造が簡単であることから、小形化に有利であり、今後は様々な分野での適用が期待できる。

例えば、小形軽量で高信頼性を求められる宇宙空間での使用が考えられる。宇宙で使う機器の高発熱化に対応する、熱制御システムの冷却機の冷媒を駆動するポンプである。次に、燃料電池の送液補機などへの適用である。燃料電池は、二酸化炭素を発生させないことからクリーンエネルギーとしての期待が高いが、補機として多くのポンプが必要とされる。耐久性が重要であり、それ以外にも電池の補機として使用されるためには、消費電力の少ない、効率の高いポンプが必要とされる。その他、高発熱電子機器の冷却装置や、医療分野、食品分野など多くの分野での応用が期待される。

トロコイドギヤポンプの内部流動であるが、内外 2 つの歯車で流体を封入する複数の密閉室の位置と形状が回転に伴い時間的に変化するため、複雑である。密閉室に封入された流体はレイノルズ数 (Re 数) に依存した流動を持つが、さらに、実際のポンプには、ギヤ部の破損及びキャビテーションを防ぐ為に、両ギヤの間にクリアランスと呼ばれる隙間が設

けられており，完全な容積形ポンプではない．その隙間の影響でさらに複雑な流動状態となる．ポンプの実用化のためには，ポンプ内部の流体駆動原理を探る必要があり，ポンプ内部流動を可視化することで，その課題を明確にする．

1.2 従来までの研究について

マイクロマシン技術の普及に伴い，マイクロTASなどのマイクロ流体システムに使用するマイクロポンプ^[7]として，トロコイドギヤポンプの発表がある^[8]．ポンプ本体の外径サイズは6 mmと小さいながら，30mg/rev の吐出特性が確認されている．これは，構造の簡単さに比べて，ポンプ吐出量が多いというトロコイドギヤポンプの特徴を示している．ポンプの構造の簡単さは，シリコンのチップ上にポンプや流体システムを一体的に加工する流体システムに，本ポンプが使用される可能性を示した．また，マイクロマシン技術の開発の中ではオイルシール方式に注目した 7mmサイズの小形高出力ポンプも発表されている^[9]．

一方，トロコイドギヤポンプの内部流動の研究として，村井ら^[10]により，Navier-Stokes方程式を用いた3次元数値解析による流動のレイノルズ数依存性が調べられている．この結果から，ポンプ特性は $Re=1\sim 10^3$ の調査範囲において， $Re=10$ 近傍で最も良くなることが明らかとなった．このような低 Re 数での良好な特性は，トロコイドギヤポンプの小形化に向けた開発が有効であることを裏付けるものとなった．一方， Re 数が高い場合には，内部流動が乱流化して，エネルギー損失が増加することになる．このとき，内部流動がどのようなプロセスで乱流化するのか，あるいはどのような流動様式をもつかについては理論的・数値解析的には，容易に予測できない．これはトロコイドギヤポンプの密閉室の形状変形速度が流体の移動速度と同程度であり，どのような事象が乱流化のトリガーになっているかを単純には推定できないためである．

1.3 本研究の目的と概要

そこで本研究は，解析だけでは解明できない流動現象を調べるために，2次元的に拘束したトロコイドギヤポンプの可視化実験装置を設計・製作，密閉室内の流動特性を $Re=250\sim 16000$ の範囲で可視化した．実験には，可視化モデルとして当初考えていたサイズの10倍モデルを製作した．この結果，隣接する2つの密閉室の隙間（クリアランス部）を流れ

る流体が乱流化のトリガーとなっていることが判明した。

本研究は、可視化手法として、トロコイドギヤポンプのように狭い隙間を持つ流体機器での流動特性の観察に適するトレーサ粒子の選定を行い、Kalliroscope と呼ばれるトレーサ粒子を選定した。このカリロスコープ粒子による可視化方法と、可視化結果の考察を行い、トロコイドギヤポンプの流体駆動原理を解明した内容について述べる。また、トロコイドギヤポンプの実用化を目指し、小形のトロコイドギヤポンプを試作し、性能改善の検討を行った。その内容についても紹介する。

本論文の主な構成を以下に示す。

第2章は、本研究で用いるトロコイドギヤポンプについて説明する。最初に一般的なポンプの種類と特徴の説明、トロコイドギヤポンプの位置づけを紹介する。実験で使用したトロコイドギヤポンプの形状や構成部品、可視化実験装置について説明する。

第3章は、カリロスコープという板状の微粒子 (platelet) で構成される可視化トレーサの特徴について述べる。この物質は流れのせん断ひずみ速度方向に平行に配向する性質を有するが、この配向と光の反射の関係について、Torsional Couette flow を利用した可視化実験を行った。その結果について考察する。

第4章は、カリロスコープ粒子を用いて、トロコイドギヤポンプの内部流動を可視化した内容について述べる。各 Re 数で撮影した可視化画像と得られた可視化画像の統計的処理を行い、トロコイドギヤポンプの内部流動について考察した。

第5章では、実用化を目指して、実際に小形のトロコイドギヤポンプを製作し、性能を確認した内容について述べる。ポンプ性能の改善、特にポンプの損失を低減すべく、ポンプケースに動圧を発生する溝を設けて動圧軸受を構成し、ポンプの性能を確認した。その内容について述べる。

第6章は、第2章、第3章、第4章、第5章における研究成果を総括して述べる。

第2章

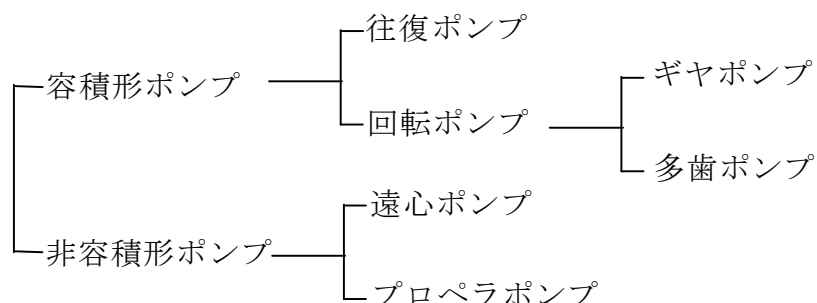
トロコイドギヤポンプ

2.1 緒言

本章ではポンプの分類とトロコイドギヤポンプの特徴について述べる。

2.2 ポンプの分類

ポンプの種類は、多種多様であり、分類の仕方もいろいろある。原理構造上から分類すると、以下のようなになる^{[11],[12]}。



容積形ポンプは、ロータ（可動部）とケーシング（静止部）あるいは二つのロータの間に生じる空間の周期的容積変化を利用して、流体を吸引、圧送する。シリンダ内でピストン又はプランジャが往復する往復ポンプと、ケーシング内で1つまたは2つ以上のロータが回転する回転ポンプに大別される。

往復ポンプ

往復ポンプはシリンダ、ピストン、吸引弁および吐き出し弁で構成される。ピストンの移動により容積を変化させ、圧力を与えて吐出する構造で高圧作動に適しており、一般的

に送水や油圧伝道装置用のほか、石油精製、石油化学工業、合成繊維工業、合成樹脂工業などの高圧を有する用途に用いられる。往復式ポンプの欠点は、流れに脈動が生じて振動、騒音による種々のトラブルが発生することである。そのため、吐き出し圧力の過度の上昇による管路の破損や過負荷による動力源の損傷を防ぐため、安全弁（リリーフバルブ）を設ける必要がある。

回転ポンプ

回転ポンプは、ロータとケーシング（または二つのロータ）で流体を閉じ込める空間を形成し、ロータの回転により空間の容積を変化させて流体にエネルギーを与える。原理は往復ポンプと同様であるが、吸い込み弁及び吐き出し弁の代わりにケーシングに吸い込み口と吐出し口が設けられている。往復ポンプに比べると吐き出し圧は低いが、吸引弁、吐き出し弁を必要としないので構造が簡単で製作費も安い。また、回転運動なので脈動も小さく、しかも長期の使用にも耐える。回転ポンプの欠点は、構造上、摩擦摺動部分が多いところである。摺動部の漏れ対策が難しく、その精度が悪いと効率が低くなることである。このポンプのロータ形状には様々な種類があるが、分類すると以下のようになる。

(A)ギヤポンプ

Fig.2.1にギヤポンプの構造を示す。いろいろな歯車を2枚組み合わせて、ギヤが開くときに吸入し、閉じるときに吐出するようにしたポンプである。開くときには、今までギヤがかみ合っていたところが開いて空間ができるため、低圧部ができる。そこに、流体が流入する。流体はギヤの回転により移動し、ギヤのかみ合い部から流体が吐出することになる。このギヤポンプは、その構造から、外接形歯車を用いるものと内接形歯車を用いるものがある。

外接形は（a）に示すように同一歯車1対を組み合わせて歯溝とケーシングに囲まれる空間を利用するポンプである。内接形は（b）に示すように外歯車と内歯車を内接するようにケーシングに納め、それぞれ中心をずらしてある。そのずれた部分にクレセントと呼ばれる三日月状の仕切り板をもうける。内外の歯車を同方向に回転させ、それぞれの歯溝とクレセントで囲まれる空間を利用するポンプである。ギヤポンプの歯形は、通常インボリュート曲線で形成される。インボリュート歯車は製作精度が高く、かみ合い部での接触箇所が複数個あるので漏れが少なく高圧用に適する。しかし、かみ合い部に出来る閉じこみ空間の容積が回転中に変わるので振動・騒音の原因となり、これを避けるために側板に逃げ溝を設けるなどの工夫が必要になる。インボリュート以外の歯形は、正弦曲線、欠円、サイクロイド曲線、トロコイド曲線などの種々の形状のものが考えられている。これらの

歯形は1点接触形で噛み合い部に閉じ込み空間が無いので騒音が小さく、低圧用に適している。また、(c)はクレセントの無い内接形である。歯数が1枚違って、中心がずれている点は同じであるが、外歯車と内歯車の間の空間が常に閉じるように工夫したものである。本実験で扱うトロコイドギヤポンプはこのタイプの歯車になる。

(B)多葉ポンプ

Fig.2.2に構造を示す。(a)に示すような、1対の蘭形ロータを、互いに接触しないようにわずかな隙間を保って、同期歯車で逆方向に回転させることにより容積変化させる方式のポンプが二葉ポンプである。非接触であるため潤滑油を必要とせず、長寿命である。しかし、隙間が漏れ効率に影響するので高圧用にはあまり適さない。ロータの形状には、サイクロイド曲線、インボリュート曲線、エンベロープ曲線などがある。(b)に示すような形状のタイプは単葉ポンプと呼ばれ、脈動が大きい。(c)に示すような形状のタイプは三葉ポンプと呼ばれ、こちらの方が振動・騒音が小さい。これらのロータ葉数が複数のものを、多葉ポンプという。

本トロコイドギヤポンプは、Fig.2.1 (c)の歯車ポンプの内接形に属し、トロコイド曲線で形成された内歯車と外歯車が、常に閉じた空間を作る。このため、本ポンプは他のポンプに比べて、低騒音であり、構造が簡単という工業的長所を持つ。特に構造が簡単であることは、ポンプの小形化を容易にする。

2.3 トロコイドギヤポンプの形状と特徴

トロコイドギヤポンプの形状は、内側ギヤが式(2.1)、外側ギヤが式(2.2)で定義されるトロコイド曲線による。

$$\begin{pmatrix} x_i \\ y_i \end{pmatrix} = (a_i + b) \begin{pmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{pmatrix} - b \begin{pmatrix} \cos c_i \theta \\ \sin c_i \theta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

$$\begin{pmatrix} x_o \\ y_o \end{pmatrix} = (a_o + b) \begin{pmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{pmatrix} - b \begin{pmatrix} \cos c_o \theta \\ \sin c_o \theta \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

$$c_i = 1 + a_i/b, \quad c_o = 1 + a_o/b \quad (2.3)$$

ここで添字 i, o は内側ギヤ, 外側ギヤを意味する. x, y は媒介変数 θ による曲線上の座標で, 外側ギヤの回転軸を原点とする. a, b はそれぞれギヤの基底円半径と転円半径である. 1つのギヤは転円が1周するごとに内転サイクロイド ($b < 0$) と外転サイクロイド ($b > 0$) を交互に合成した形状をもつ. ここで内側ギヤと外側ギヤの歯数がそれぞれ k_i, k_o のとき, 次の関係をもつ.

$$k_o = k_i + 1 \quad (2.4)$$

$$a_o/a_i = k_o/k_i \quad (2.5)$$

$$a_i/b = 2k_i, \quad a_o/b = 2k_o \quad (2.6)$$

以上の式が連立した条件のもとでは, 内側ギヤの歯数 k_i (ただし1以上の整数) のみを指定すれば, トロコイドギヤポンプの相似形状が決定する.

Fig.2.3 は $k_i=4$ の場合のトロコイドギヤポンプ形状の概略図である. ここで式(2.1)～(2.6)では, 内外2つのギヤが接触する点が理論的に k_i-1 個存在し, このうち1つは相互に相対速度をもたない点となる. しかし実際にギヤを回転させる場合は, 相対速度をもつ接触点で固体摩擦が生じ, 大きなトルク抵抗^[13]となるため, わずかなクリアランス (図中の ε) を設けて回転させる. ちなみにクリアランス ε はギヤの摩耗に伴って自然発生的に生じる程度 (例えば $5\mu\text{m}$ 以下) である (Fig.2.3 は分かりやすくするため誇張して描画). この結果, 2つのギヤは相対速度をもたない1つの点だけで接触する. ギヤが正常に噛み合って回転する限り, この接触点では周速度を共有するから, 内側ギヤの回転角速度 ω_i と外側ギヤの回転角速度 ω_o は次式の関係をもつ.

$$\omega_o/\omega_i = (a_o/a_i)^{-1} = (k_o/k_i)^{-1} \quad (2.7)$$

以上をまとめると，トロコイドギヤポンプの流れ場は内側ギヤ歯数 k_i を指定すれば，その式(2.8)による Re 数と無次元クリアランス ε / a_i の2つで評価される．

$$\text{Re} = \frac{2a_i U_c}{\nu} = \frac{2a_i^2 \omega_i}{\nu} \quad (2.8)$$

ここで ν は流体の動粘度， U_c は接触点の周速度($=a_i \omega_i$) である．流体の出入口は Fig.2.3 の楕円部分に設けられており，ギヤの回転軸方向に流出入する．

2.4 本研究の可視化モデル

Fig.2.4 に本研究で製作したトロコイドギヤポンプの可視化モデル外観写真を示す．ギヤ緒元は，内側ギヤの歯数が $k_i=4$ ，内側ギヤの基底円半径が $a_i=38.4\text{mm}$ である．外側ギヤの歯数は $k_o=5$ ，外側ギヤの基底円半径は $a_o=48\text{mm}$ である．ギヤの回転軸方向の厚さは 4mm とし，流体密閉室内の 2 次元的な流動を可視化の対象とした．使用材料は，内側ギヤと外側ギヤはポリエーテル・エーテル・ケトン材料(PEEK 材，Victrex Plc.社)を選定した．PEEK 材は耐摩耗性・耐腐食性に優れた不透明な材料である．これ以外のケーシングはすべて耐熱変形性および耐薬品性に優れた透明のポリカーボネード樹脂 (PC 材) で構成した．可視化可能にするためには，透明度が必要であるが，PC 材表面は切削加工により白濁する．したがって水溶性クリア塗装を行い透明化処理を実施した．クリア塗装には，塩化メチレン（沸点：41.2℃）およびジクロロエタン（沸点：83℃）の蒸気を利用した．Fig.2.5 はギヤの上ケースの PC 材に施したクリア塗装前後の透明度の差異を示す．背景の粒子分布が，クリア塗装後になるとはっきりと映し出されている．その他の可視化モデルに用いた部品の写真を Fig.2.6 に示す．Fig.2.6 の a) は内側ギヤと外側ギヤ，b) はそれらを支持するギヤケースである．c) は b) を支える下部ケースであり，流入口と流出口及び半月形状の水溜り用溝が設けられている．d) はこれらを組み合わせたポンプの上面図である．

本ポンプの回転角度毎のポンプ形状を Fig.2.7 に示す．赤字が内側ギヤの回転角度，黒字が外側ギヤの回転角度である．内側ギヤと外側ギヤのギヤ数の比が 4 : 5 であるため，外側ギヤの角速度は内側ギヤの 4/5 倍となる．両ギヤが回転すると，両ギヤ間の密閉室の形状は滑らかに変形しながら移動し，密閉室の形状は内側ギヤの 1/4 回転を 1 周期として変化

する．なお，両ギヤ間の密閉室の全容積はギヤの角度によらず常に一定である．

Fig.2.8 は画像取得のための実験装置である．ギヤの回転はステッピングモータ（オリエンタルモータ社製:PK-545-A）を用い，コントローラ（オリエンタルモータ社製:DFU1507）はポンプの真下部分に設置した．光源はメタルハライドランプ(HVC-SL 出力:125 W)を3台用い，本ポンプに対して3方向から，それぞれポンプに対して 45° の入射角になるように照射した．撮影は高速度カメラ（FASTCAM-MAX）で行い，カメラはポンプに対して550mmの鉛直方向に設置した．カメラのレンズには焦点距離 50mm のレンズ（TEC-M55, 1:2.8）を用いた．ギヤの回転速度はステッピングモータにより制御し，2.7～27rpm の範囲で回転させた．メタルハライドを3方向から照射するフロントライト法で行った．この際，ポンプの軸受けケースの底面に不透過の黒紙を貼り，外からの光の影響を抑えた．回転開始後，安定したところで，ポンプから 550mm の鉛直方向に設置した高速度カメラを用い，レンズの絞りを開放して，フレームレート 60～125FPS，シャッター速度 1/21000s で撮影した．撮影された画像は，BMP 形式，1024×1024 pixel のグレースケールとして，カメラに接続した P C 内のハードディスクに記録した．実験条件の詳細は Table 2.1 に示す．

Table2.1 Experimental conditions

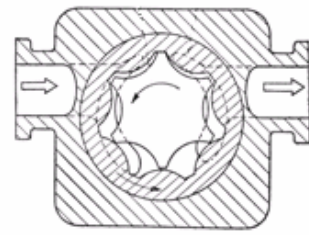
Flame rate	60~125 FPS
Shutter speed	1/21000 s
Rotating speed	2.7~27 rpm
Density	1000 kg/m ³
Kinematic viscosity	$1.519 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
Temperature	278 k
Reynolds number	10, ~100 -



a) Circumscribed type

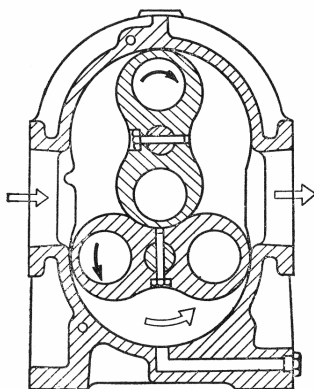


b) Inscribed type

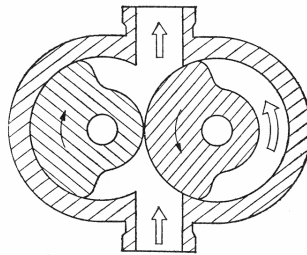


c) Inscribed type
(no crescent)

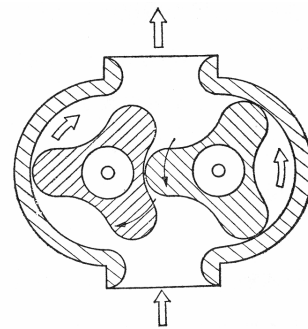
Fig.2.1 Gear pumps



a) Bifoliate type



b) Unilobed type



c) Triphyllous type

Fig.2.2 Multifoil pumps

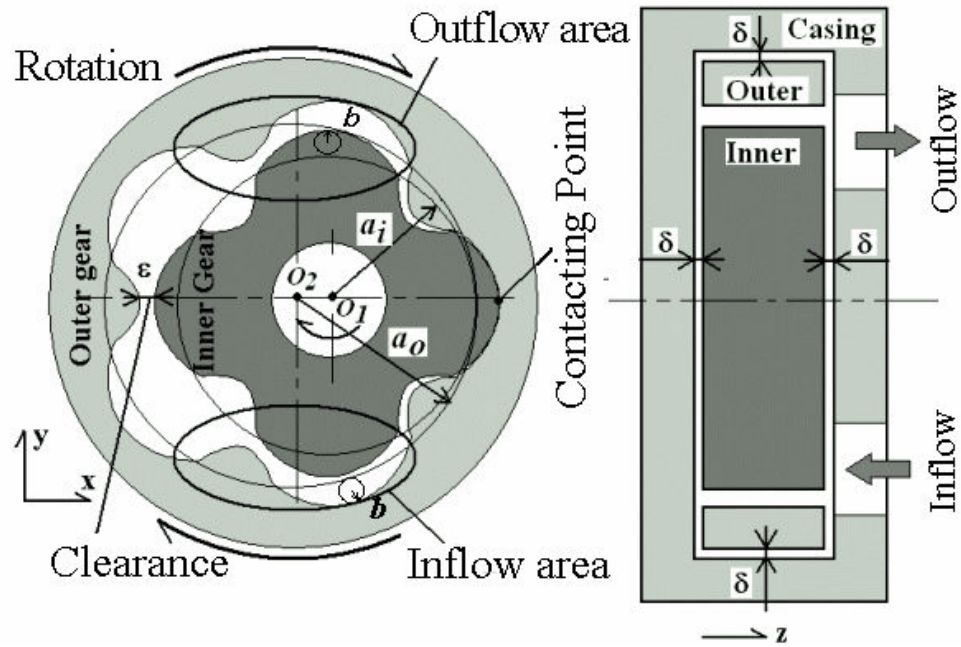


Fig.2.3 Schematic diagram of trochoid gear pump

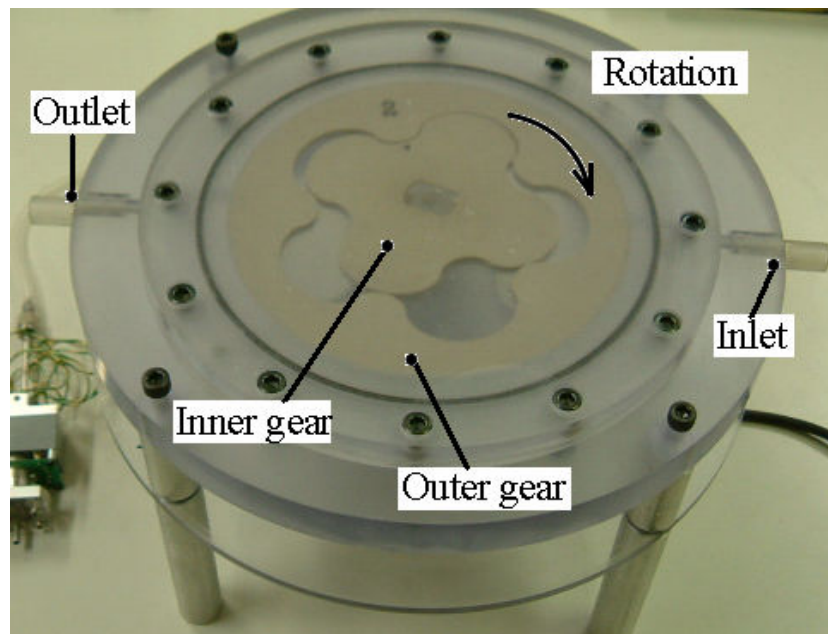
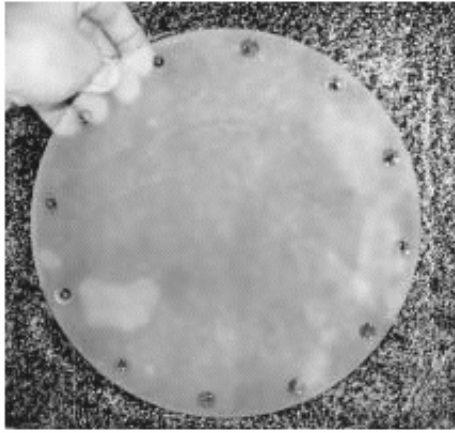
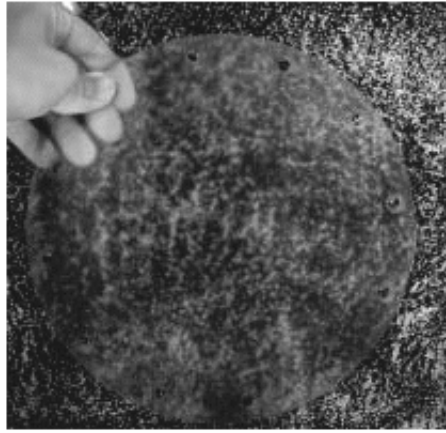


Fig.2.4 Transparent model for flow visualization



(a) Before coating



(b) After coating

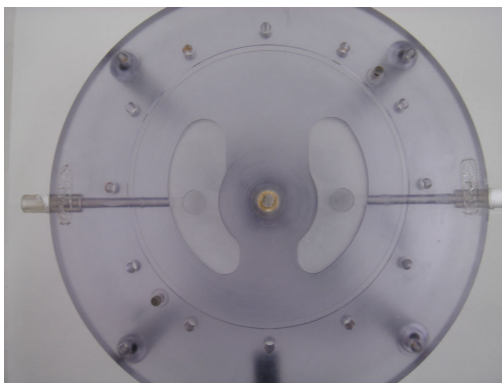
Fig.2.5 Effect of clear coating for polycarbonate plate



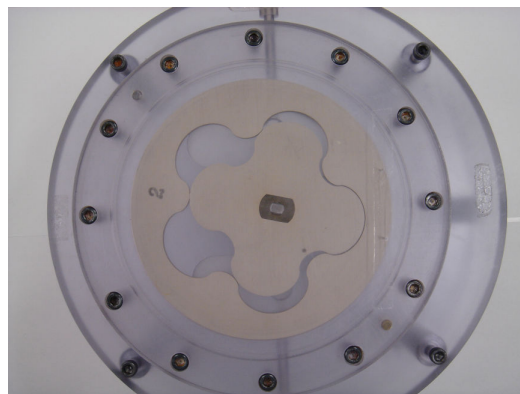
a) Inner gear and Outer gear



b) Gears and Gear case



c) Inlet and Outlet



d) Trochoid gear pump

Fig.2.6 Parts of trochoid gear pump for transparent model

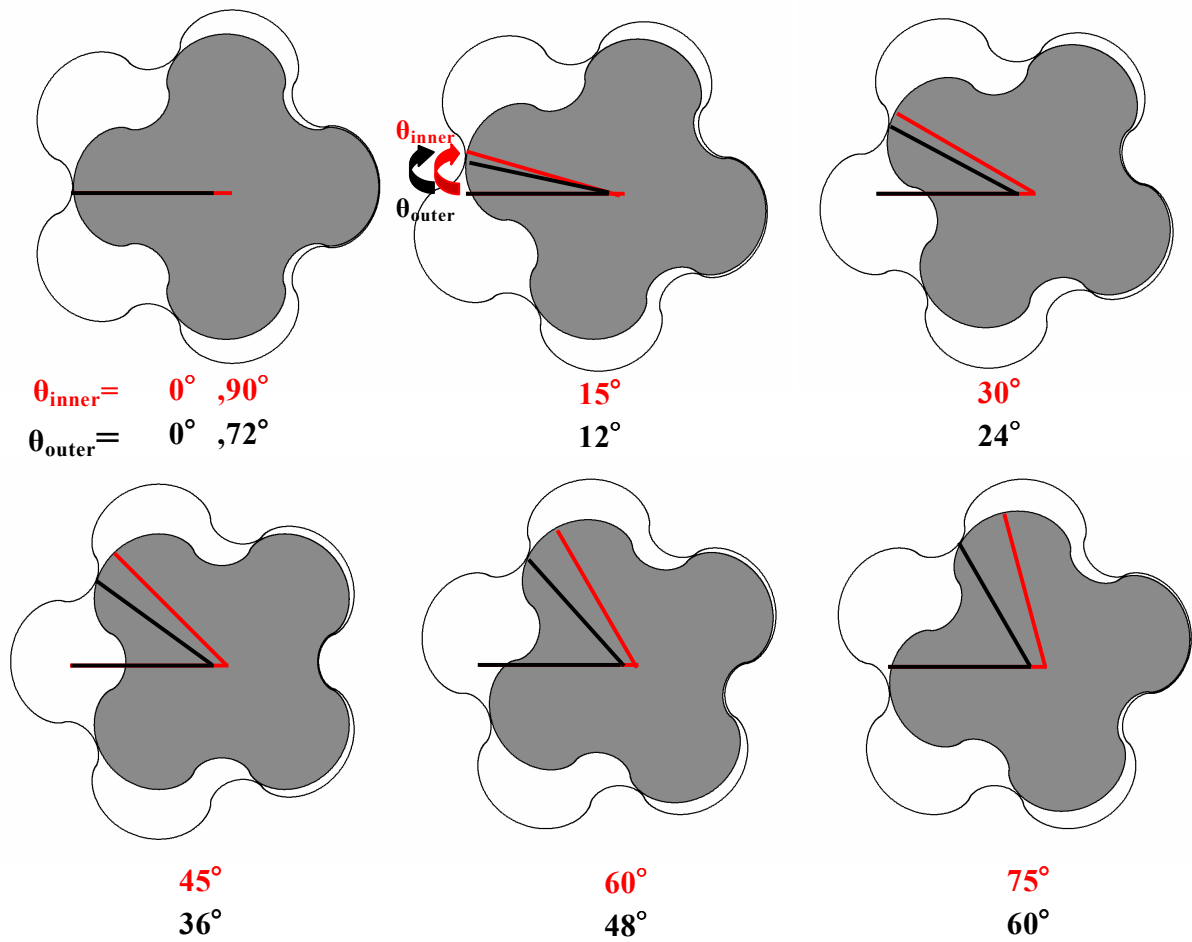


Fig.2.7 Rotational angle of trochoid gear pump

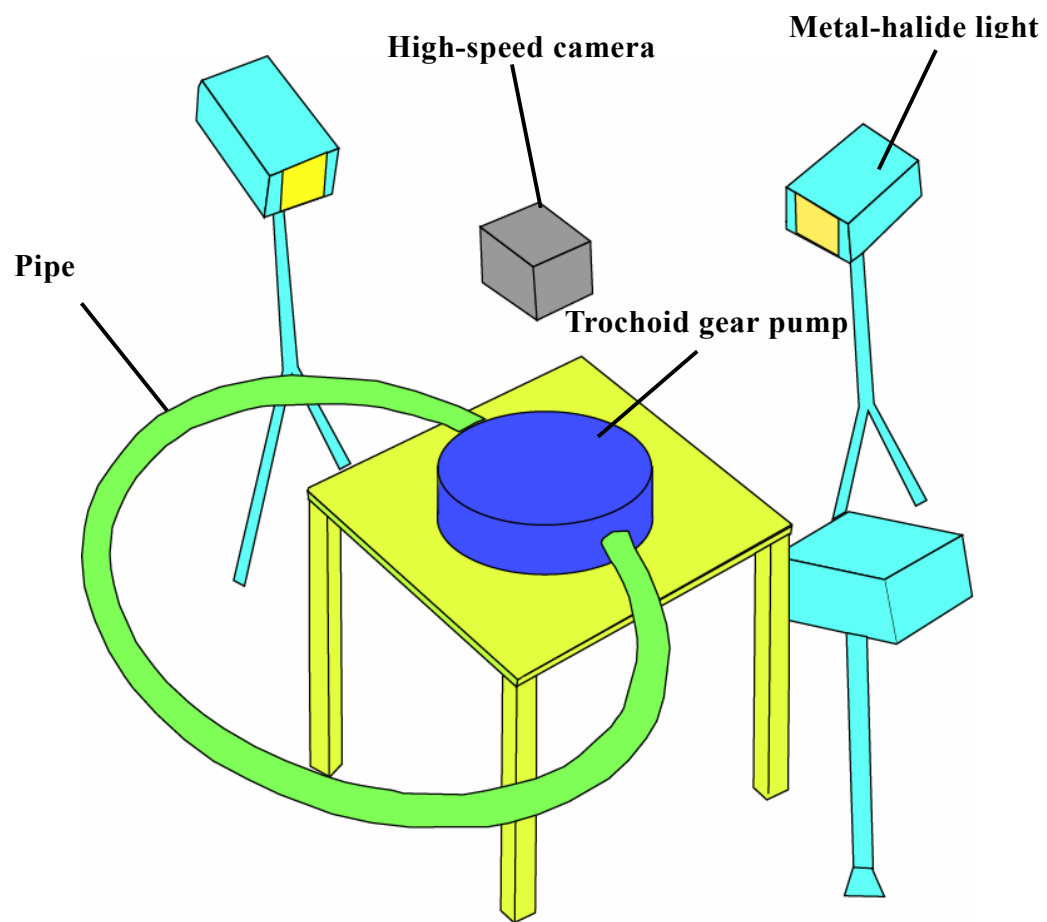


Fig.2.8 Experimental apparatus

第 3 章

可視化トレーサ

3.1 緒言

本章では，トロコイドギヤポンプの内部流動の可視化実験に用いたトレーサ粒子について述べる．可視化実験を遂行するにあたり，幾つかの異なる種類のトレーサ粒子で予備実験を行ったが，最終的には微小平板状の形状を持つ，カリロスコープ粒子を選定した．このカリロスコープ粒子は，流れのせん断ひずみ速度方向に平行に配向する性質を有するところに，その特徴がある．この配向と光の反射の関係について，Torsional Couette flow を利用して可視化実験を行った．その実験結果について考察する．

3.2 可視化トレーサの選定

3.2.1 予備実験

トロコイドギヤポンプのような，内外ギヤのかみ合い部などの，狭い領域を流体が移動する機器においては，適切なトレーサの選定が難しい^{[14],[15]}．まず各種のトレーサによる予備実験結果を下記に示す．

(1) 粒径が $100\sim 300\ \mu\text{m}$ のナイロン粒子の場合

トロコイドギヤポンプにおけるクリアランス (Fig.2.3 で ε と記載) の部分に粒子が入り，大きなトルク抵抗をもたらしギヤが高い頻度で停止した．このため可視化実験を実施することが不可能となった．

(2) 粒径が $10\sim 50\ \mu\text{m}$ のイオン交換用微粒子の場合

素材が多孔質で脆性があるため，クリアランス部に粒子が進入しても粒子が破壊されることでギヤの停止は回避された．しかし時間経過とともに流体の白濁が進行し，最終的に

長時間の可視化を実現するに至らなかった。

(3)不混和液滴をトレーサとした場合

水に微量のシリコンオイルを添加し攪拌によって微小液滴状に分散させ、この液滴をトレーサとして流動の可視化を試験した。しかし対象とする流動の条件は低流速であり、界面張力等が流れを支配し、可視化装置内に油膜が形成されるなどして安定な油滴分散状態を維持することができなかった。

そこで狭い隙間に対応できる形状が微小平板状であるカリロスコープ粒子（米国 Kalliroscope 社，AQ-1000）を選定した。

3.2.2 カリロスコープ粒子について

Fig.3.1 は Kalliroscope 社の HP (<http://www.kalliroscope.com/>) に記載されている流動状態を示す写真である。1 枚の写真だけで瞬時の渦・せん断の構造を把握できるところに特徴がある。なお、カリロスコープ粒子は商標名であるが、この粒子は 20 年以上前から流体の可視化用として提案されている。この名称の認知度が高いため、本報もカリロスコープと記す。

まず、カリロスコープ粒子の主成分であるが、親水性のあるグアニンで、真密度は 1620kg/m^3 である。同粒子はプレートレット (platelet) と呼ばれる微小平板状の形状をもち、流動に対して高い時間応答性を持つ。同粒子の表面は光沢性があり、外部から照射された光を鏡面反射する性質を持つ。このとき粒子は板状であり流体のせん断によって配向するため、せん断の方向に従って散乱光に模様が現れる。流れのせん断ひずみ速度方向に配向するため、計測対象の流体に混入し、照明を当てることで得られる輝度情報から、容易に流れの構造を考察することが出来る。このような特徴から、同粒子は渦や乱れなどの非定常性に富む流動の定性的可視化に従来から利用されてきた^{[16],[17],[18]}。同粒子によって画像上に映し出される模様と流動の関係は、同粒子がせん断で配向する性質と、光の鏡面反射によって説明される。この可視化機構の詳細は Gauthier^[19]や Thoroddsen^[20]の論文に報告されている。彼らは 3 つの異なる角度からの異なる色の光を入射させ、渦の 3 次元構造の抽出に成功している。このほか最近では熱対流^[21]、魚の後流^[22]、および種々のせん断乱流^{[23],[24]}の可視化にも利用されている。

3.2.3 カリロスコープ粒子とアルミ粉末との比較

Fig.3.2 にカリロスコープ粒子を顕微鏡で観察した拡大撮影画像を示す。この画像から、粒子は虹色に反射しており、気泡や液滴のように界面が平滑で、この面によって光が反射していると推測出来る。また、サイズは同社の仕様書によれば、約 $6 \times 30 \times 0.07 \mu\text{m}$ であるが、画像からは $1 \sim 10 \mu\text{m}$ 程度の大きさで見受けられる。

このような薄膜状で光沢がある微小な可視化用トレーサとして従来から用いられているものに、アルミ粉末がある。アルミ粉末も計測対象の流体に混入し、照明を当てることでカリロスコープ粒子のような模様を得ることが出来るため、流動の可視化に用いられてきた。アルミ粉末もカリロスコープ粒子と同様に、せん断に対して配向するが、配向による光学的性質は異なる。Fig.3.3 にアルミ粉末の顕微鏡による拡大撮影画像を示す。粒子は鱗片であるが、カリロスコープ粒子と違い、サイズが不均一で、表面に凹凸がある。そのため、カリロスコープ粒子ほどせん断ひずみ速度の変化に対する応答性が良くないと考えられる。また、アルミ粉末は表面が酸化するので、光の反射率も低いと考えられる。カリロスコープ粒子に比べて比重も高いため、渦のような遠心力が生じるような流れでは、渦の中心から外れるなどして密度に分布が生じて模様が発生するなどの、配向性以外の要因も関わってくる。

以上から、カリロスコープ粒子とアルミ粉末は光沢性があること及び非球形であることが共通点であり、この点で類似した性質を持つが、カリロスコープ粒子に比べてせん断ひずみ速度方向の変化に対する応答性は低い。

アルミ粉末と比較したカリロスコープ粒子の特徴は以下にまとめられる。

- 主成分はグアニン（DNA や RNA の構成成分）という有機物であり、下水にそのまま流すことが可能である。アルミ粉末は、人体に有害であるため、処理する際に注意する必要がある。
- 密度がアルミ粉末の 2700kg/m^3 と比較して 1620kg/m^3
- 水に対する親水性(接触角)が大きい。
- アルミ粉末に比べて $0.1 \sim 0.2$ 倍程度のサイズである。
- トレーサとして規格化されておりアルミ粉末よりも均一性が保障されている。
- 界面活性剤が必要でないので、実験の際に流体に与える影響が小さい。アルミ粉末は使用前に界面活性剤やアルコールに浸さないと壁面に付着する恐れがある。
- 磁場や電場の影響を受けにくい。
- アルミ粉末に比べて高価である。（AQ-1000, 60\$ / 0.5L）

3.3 トーショナル-クエット流を用いた可視化

ここで、カリロスコープ粒子の流動写真は何を示しているかを考える。そのため、比較的単純なせん断ひずみ分布が得られるトーショナル-クエット流 (Torsional Couette flow, 以下 T-C flow) で、カリロスコープ粒子の可視化実験を行った。T-C flow は理論上、回転速度に比例した速度分布になり、そのせん断ひずみ方向は回転速度に関係なく一意的に決まる。つまり得られた画像輝度は回転速度に依存しない。そこで、回転円板と、その外周の静止壁面だけの可視化実験装置を製作し、カリロスコープ粒子の配向と画像輝度の関係を明らかにする。実験の目的は次の二点である。1つは照明の入射方向とカリロスコープ粒子の反射の関係である。Fig.3.2 で虹色の光沢が観察されており、カリロスコープ粒子の表面は乱反射でなく鏡面反射であると推測できる。まず照明方向を変えて、画像輝度値の角度依存を確認する。もう1つは、カリロスコープ粒子の配向と画像輝度値の関係である。画像輝度は配向によって変化すると考えられるが、配向と画像輝度値との関係は推測の域を出ない。そこで、数値解析で求めた回転円板による主せん断ひずみ方向分布と、カリロスコープ粒子の実験的な計測画像輝度値を比較し、その関係を考察する。

3.3.1 トーショナル-クエット流の主せん断ひずみ速度方向の計算

数値解析手法

本研究では、円柱座標系の Navier-Stokes (N-S)方程式を用いて定常な T-C flow の速度分布を求める。円柱座標系の N-S 方程式は一般に(3.1)式で表される。ここで、半径方向を r 、周方向を θ 、軸方向を z 、上部、外縁壁面を non-slip 条件、内縁、下部壁面は角速度一定条件とし、半径は後述する実験装置のサイズに合わせて計算する。計算条件を Table 3.1 に、境界条件は Fig.3.4 に示す。

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_r}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + u_\theta \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + u_z \frac{\partial u_r}{\partial z} - \frac{u_\theta^2}{r} &= -\frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_r}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_r}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} - \frac{u_r}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} \right) \\ \frac{\partial u_\theta}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + u_\theta \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + u_z \frac{\partial u_\theta}{\partial z} + \frac{u_\theta u_r}{r} &= -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \nu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial z^2} - \frac{u_\theta}{r^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} \right) \\ \frac{\partial u_z}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_z}{\partial r} + u_\theta \frac{1}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \theta} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (3.1)$$

式 (3.1) に定常，軸対称な流れとして，半径方向及び軸方向速度を 0 とすると次式が得られる．

$$\frac{\partial^2 u_\theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial z^2} - \frac{u_\theta}{r^2} = 0 \quad (3.2)$$

差分化すると

$$\frac{u_{\theta r+1} + u_{\theta r-1} - 2u_\theta}{\Delta r^2} + \frac{1}{r} \frac{u_{\theta r+1} - u_{\theta r-1}}{2\Delta r} + \frac{u_{\theta z+1} + u_{\theta z-1} - 2u_\theta}{\Delta z^2} - \frac{u_\theta}{r^2} = 0 \quad (3.3)$$

u_θ の式にすると

$$u_\theta = \left(\frac{u_{\theta r+1} + u_{\theta r-1}}{\Delta r^2} + \frac{1}{r} \frac{u_{\theta r+1} - u_{\theta r-1}}{2\Delta r} + \frac{u_{\theta z+1} + u_{\theta z-1}}{\Delta z^2} \right) / \left(\frac{1}{r^2} + \frac{2}{\Delta r^2} + \frac{2}{\Delta z^2} \right) \quad (3.4)$$

(3.4) 式を逐次計算することで T-C flow の周方向速度成分 u_θ を計算する．

数値解析結果

Fig.3.5 に各回転数条件での周方向速度成分 u_θ の解析結果をカラーコード表示する．a)～d) は回転数 0.1～100rpm の解析結果である．左側が回転中心，右側が外縁である．わかりやすくするために，縦横比は変更して表示する．カラーコードは，周方向速度 u_θ の速い領域を暖色，遅い領域を寒色で示す．各回転数の計算条件による最大値，最小値でカラーコード表示したため，カラーコードのスケールは異なるが，予想通り全ての回転数条件で周方向速度分布は，同様の結果になった．これは，式 (3.1) の微分方程式が線形であり，解が比例的に変化するという事で説明できる．主せん断ひずみ速度方向は下部回転円盤の回転速度に関係なく，常に同じ方向であり，つまり，カリロスコープ粒子による T-C flow 実験の場合，層流条件であれば，回転速度に無関係に同じ輝度を示すものと考えられる．Fig.3.6 は Fig.3.5 の結果から式 (3.5) より算出した主せん断ひずみ方向の分布である．この値は，カリロスコープ粒子が主せん断ひずみ速度方向に配向した場合のカリロスコープ粒子の垂直方向平均投影面積に対応するものである．同図の縦軸は Fig.3.7 に示す垂直軸に対する方向ベクトルの角度 θ から得られる方向余弦を示す． $\cos\theta=0$ で配向の向きが垂直， $\cos\theta=1$ が水平を表す．

$$\cos \theta = \frac{\left| \frac{\partial u_\theta}{\partial z} \right|}{\sqrt{\left(\frac{\partial u_\theta}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_\theta}{\partial z} \right)^2}} \quad (3.5)$$

3.3.2 実験による画像輝度分布の計測

実験装置及び実験方法

Fig.3.8 に可視化実験で使用した部品と装置の外観を示す．Fig.3.8 の a) は左から回転円盤，偏心支持板，それらを支持するケースであり，b) はこれらを組み合わせた装置の組立写真である．実験装置は前章で述べたトロコイドギヤポンプ可視化装置の外側部分を使い，内部の部品を変更した．ギヤの歯部を持たない下部回転円盤を新製して，内側ギヤの代わりに回転軸に設置した，その外側には偏心支持板（切り欠き付き）を取り付けた．これは，本ポンプの内側ギヤは偏心しており，その影響を抑制するためである．ポンプの下部にある流入流出口は本実験では用いないため，下部円盤と偏心支持板の下に底板を設置して，流入流出口をふさいだ．

本実験装置での画像取得は，Fig.2.8 に示す装置を使用した．円盤の回転にはステッピングモータを用いた．光源はメタルハライドランプ(HVC-SL 出力：125W)を 2 台とし，左右 2 方向から光を照射した．光源はそれぞれ水平面に対して 30° ， 45° ， 60° の 3 種類の入射角で照射した．撮影は高速度カメラ (FASTCAM-MAX) で行い，カメラはポンプに対して 550mm の鉛直方向に設置した．カメラのレンズには焦点距離 50mm のレンズ (TEC-M55, 1:2.8) を用いた．作動流体には Kalliroscope AQ-1000 5%mass の水を用いた．

実験手順を以下に示す．回転円盤の回転数はステッピングモータの駆動周波数を調節して変化させ，0～100rpm で回転させた．メタルハライドランプは左右 2 方向から照射した．回転が安定した状態で，鉛直方向から高速度カメラを用い，フレームレート 60FPS，シャッター速度 1/21000s で撮影した．撮影された画像は，BMP 形式， 1024×1024 pixel のグレースケールで，カメラに接続した PC 内のハードディスクに記録した．本実験では各条件，300 枚の画像を計測した．実験条件を Table 3.2 に示す．なお，出入り口がないため，実験の際に内部に気泡が混入した．この気泡を取り除くために，上蓋に直系 1mm 程度の穴を設けて，取り除くなどの処置を行い，画像に気泡が含まれることを防止する工夫をした．計測した画像と一連の解析方法をFig.3.9に示す．解析は，平均化，座標変換，画像輝度値の計算で実施する．計測画像から，計測対象となる下部回転円盤以外の部分の情報を取り

除く．次に計測した画像輝度値の平均を求めた．平均化した画像輝度を円盤の回転軸を基点として，周方向に平均し，半径距離毎の平均画像輝度値を得る．同様の手順で得られた 0rpm 結果との差を求めて，各回転数条件における半径距離に対する画像輝度の変化が得られる．

照明方向とカリロスコープ粒子の反射の関係

Fig.3.10 は，照射した光の入射角度を変化した場合の画像輝度値の変化を示す．回転速度は 100rpm である．同図で $r=0$ は回転の中心を表す．この結果から，照明の入射角により光の反射が大きく変化し，入射角度が急であるほど光の反射が増すことが読み取れる．この結果は，カリロスコープ粒子が乱反射でなく，鏡面反射することを示しており，前述の考察と一致する．

カリロスコープ粒子の画像輝度と半径距離の関係

Fig.3.11 に，回転速度を変化した場合の画像輝度値の変化を示す．この結果から，半径 16mm において画像輝度値が大きく減少している．この部分は回転円盤の中心ハブと外周壁との境界になる．Fig.3.5 に示す数値解析によれば，境界部分の配向は回転円盤すなわち水平面に対して直角に近い角度になるため，画像輝度が下がったと考えられる．また，画像輝度値の半径方向への変化であるが，回転数が 1rpm, 1.7rpm と低い場合には半径方向に対して半径増加で滑らかに高くなっていることが読み取れる．解析からは半径方向に沿って配向が水平に近くなり投影面積の増加で画像輝度値が上がるはずであるが，3.16rpm 以上の回転数では逆に画像輝度値が下がっている．これは解析を non-slip 条件で行ったが，実際はこの壁面の影響を受けていること，また観察は上面から行われており，上部（浅い領域）の影響が現われるためではないかと考えられる．

3.3.3 せん断流におけるカリロスコープ粒子の特性に関する考察

画像輝度値と配向の関係

Fig.3.12 は Fig.3.6 と Fig.3.11 から求めた配向と画像輝度値の変化の関係式である．横軸はカリロスコープ粒子の配向，つまり投影面積を表し，縦軸は画像輝度値の変化である．この結果から，配向が水平になるに従い反射が増す傾向になることがわかる．定性的ではあるが，投影面積の増加と共に，右肩上がりに画像輝度値が増加している．その一方，途中で画像輝度値が減少するなども観察されており，精度の上では問題が残る．これらから判断すると，カリロスコープ粒子の画像輝度だけで定量的な判断材料とすることは難しい．

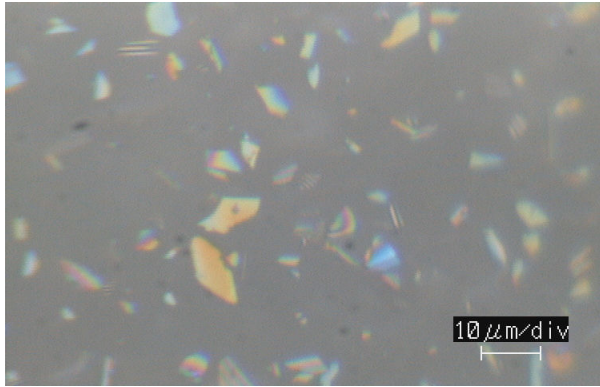
3.4 結言

本章ではカリロスコープ粒子の調査を行い，カリロスコープ粒子を用いて得られた画像情報が何を示すかについて，トーショナル・クエット流を用いて画像輝度と流動の関係を検討した．その結果幾つかの知見及び問題点を得た．それらを以下にまとめる．

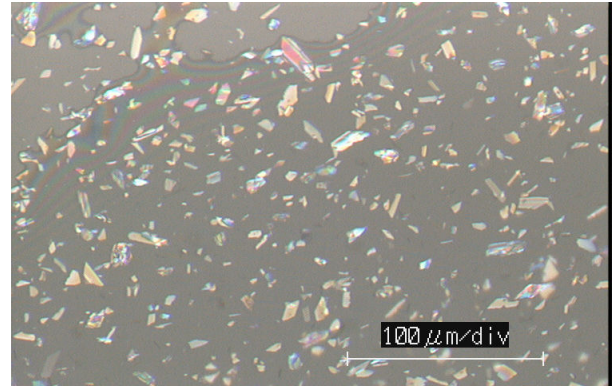
- 顕微鏡の拡大画像からは，カリロスコープ粒子は板状の微粒子であることがわかる．また，その表面が虹色に反射している点から，ミラーや気泡のように界面が分子論的に平滑で，この面で光沢を作っている．表面は乱反射でなく，鏡面反射すると考えられる．これは，トーショナル・クエット流で入射角度により輝度に差が生じることからも証明される．
- トーショナル・クエット流の結果からは，カリロスコープ粒子はせん断ひずみ速度方向に配向し，その結果反射光の輝度に変化することがわかる．また，輝度は投影面積が広いほど輝度が高く，狭いほど輝度が小さくなることが確認された．このことは，これまで推論であったカリロスコープ粒子の反射光はひずみ速度方向によって変わることが証明されたことを意味する．
- トーショナル・クエット流を用いた実験から，カリロスコープ粒子の配向と輝度の関係については，定性的な判断なら可能である．ただし，浅い領域のカリロスコープ粒子の配向が輝度に影響を与えるため，定量的な解析は困難である．



Fig.3.1 Applied example of kalliroscope for flow visualization

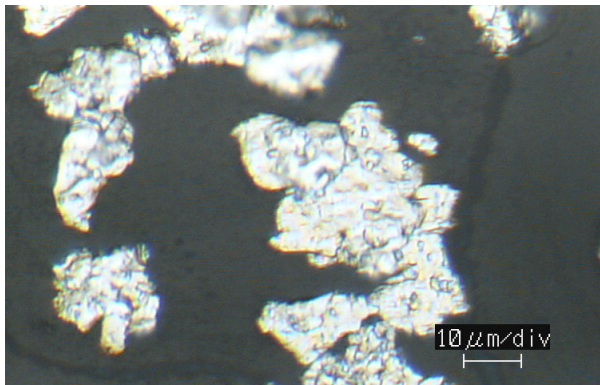


×3000

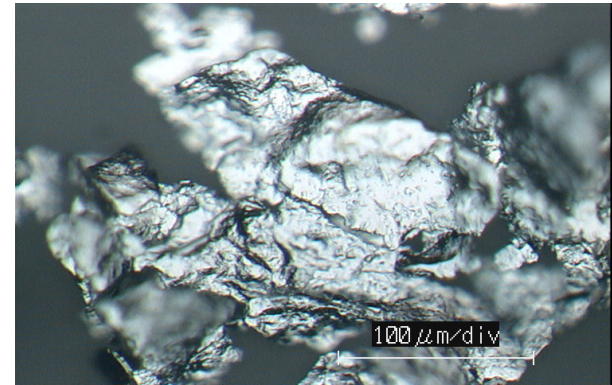


×1000

Fig. 3.2 Microphotograph of Kalliroscope



×3000



×1000

Fig.3.3 Microphotograph of aluminum-dust

Table3.1 Numerical conditions

h	2[mm]
r_0	65[mm]
r_i	15[mm]
u_θ	0.1~100[rpm]

Table.3.2 Experimental conditions

Flame rate	60 [FPS]
Shutter speed	1/21000[s]
Kalliroscope rate	5[%]
Rotating speed	1 ~ 100[rpm]
Density of liquid	1000[kg/m ³]
Kinematic viscosity of liquid	1.519 × 10 ⁻⁶ [m ² /s]
Temperature of liquid	278[k]

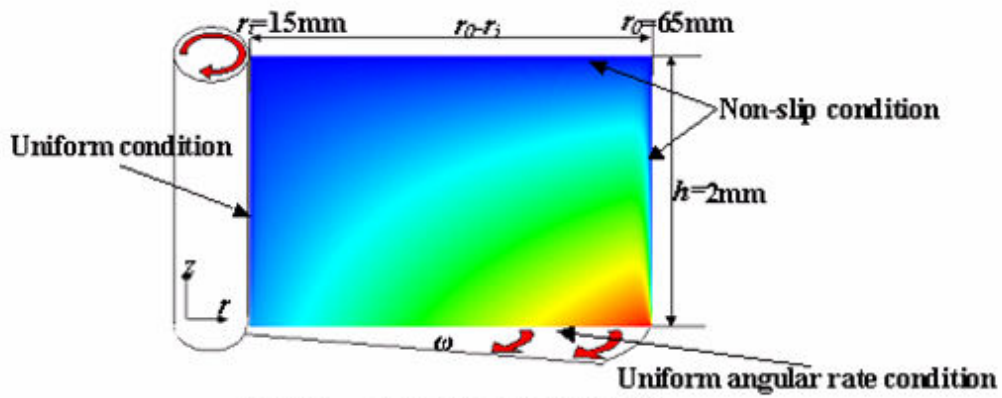


Fig.3.4 Boundary conditions

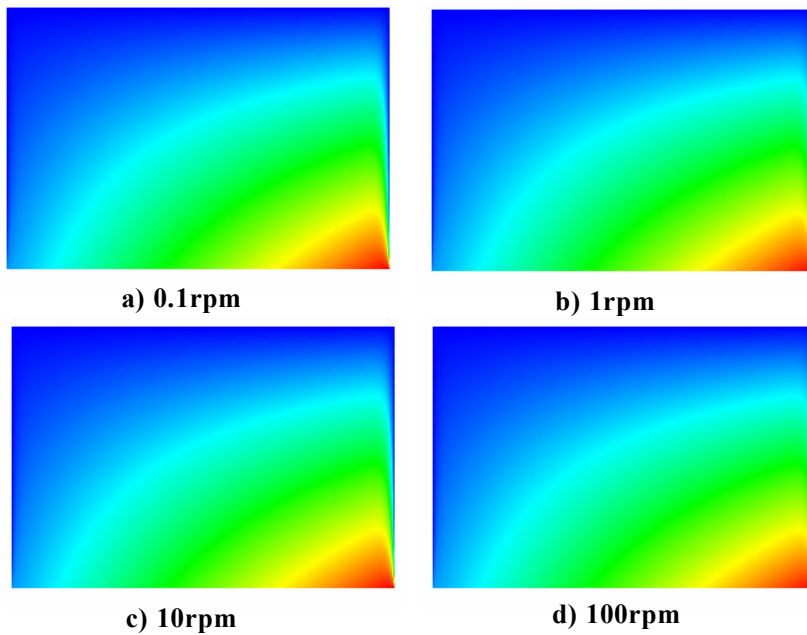


Fig.3.5 Velocity distribution of u_θ

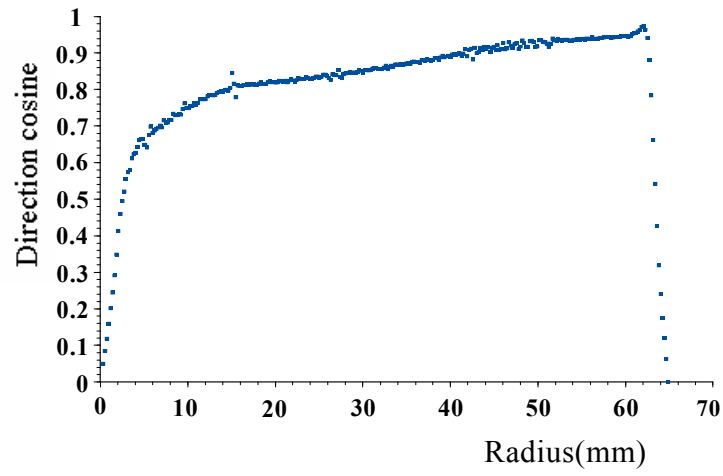


Fig.3.6 Orientation of shear plane for radius position by analysis

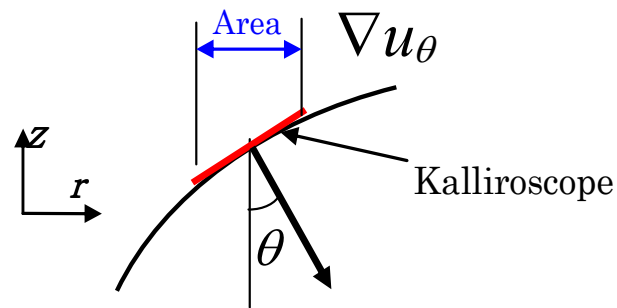
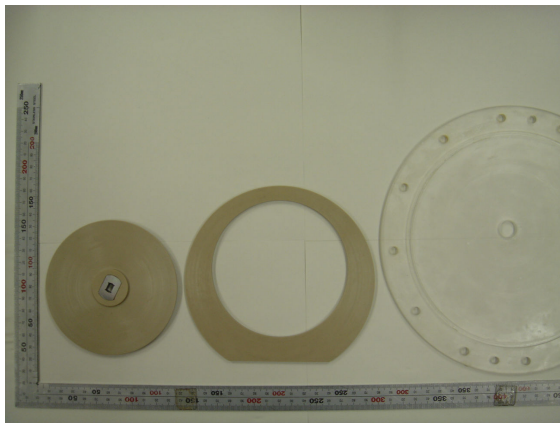
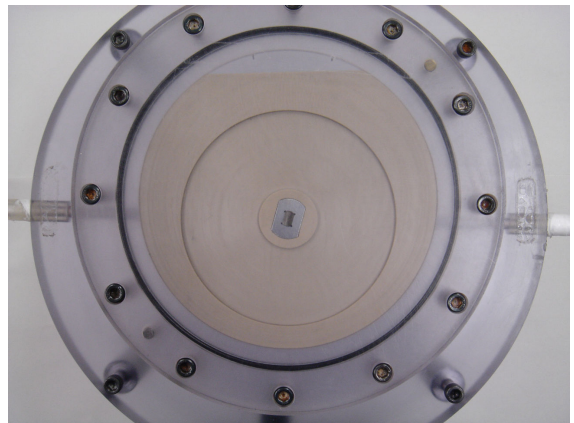


Fig.3.7 Direction cosine



a) Rotating disc and support plate



b) T-C flow apparatus

Fig.3.8 Experimental apparatus

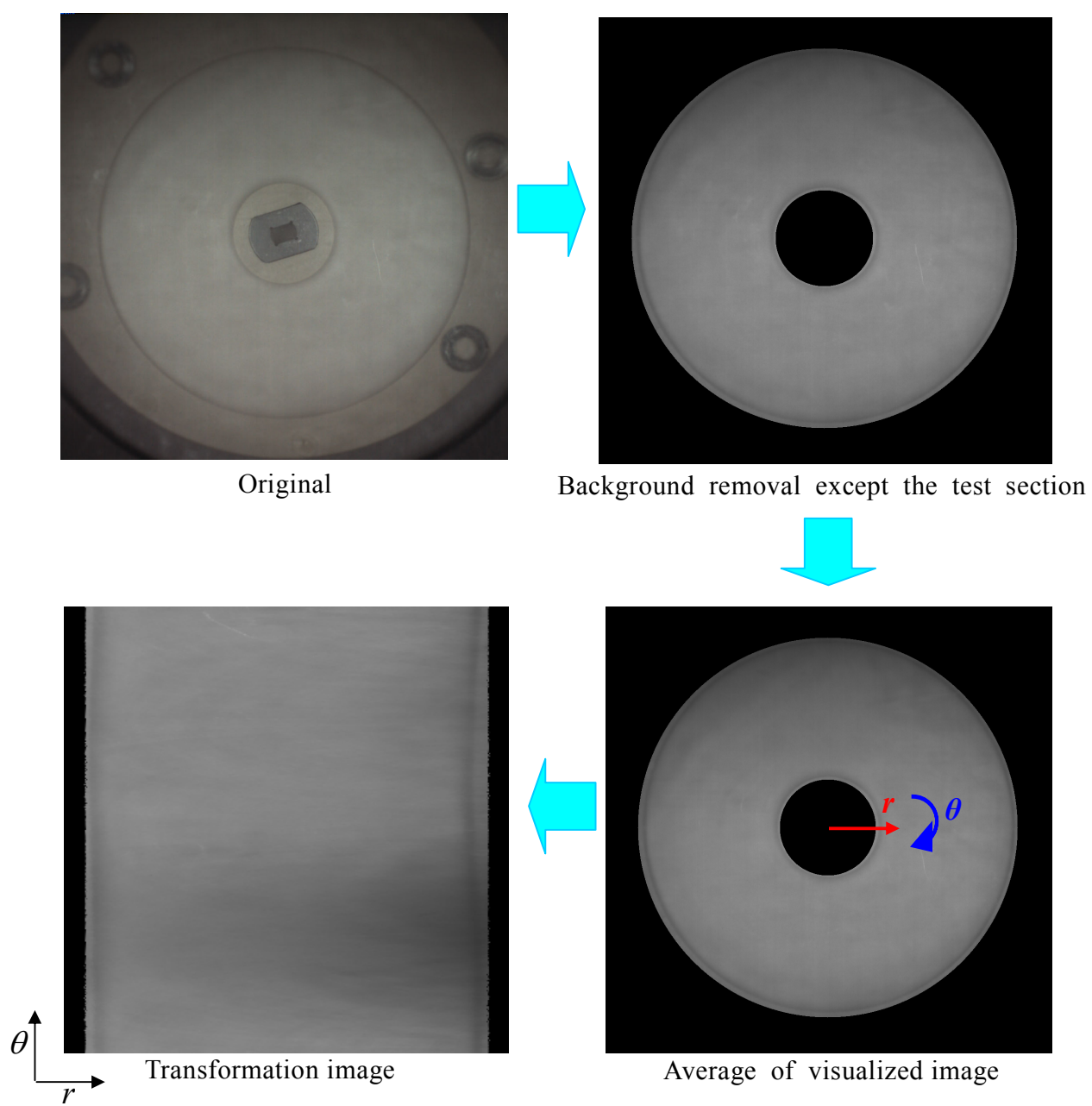


Fig.3.9 Flow chart of image analysis

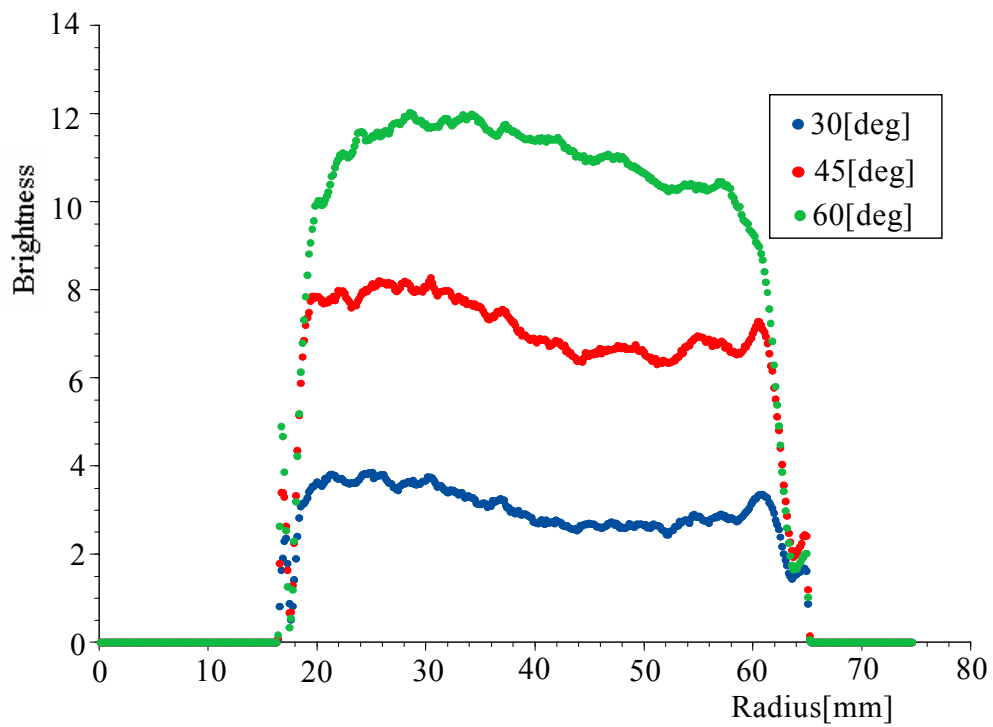


Fig.3.10 Brightness for radius position at each lighting angle

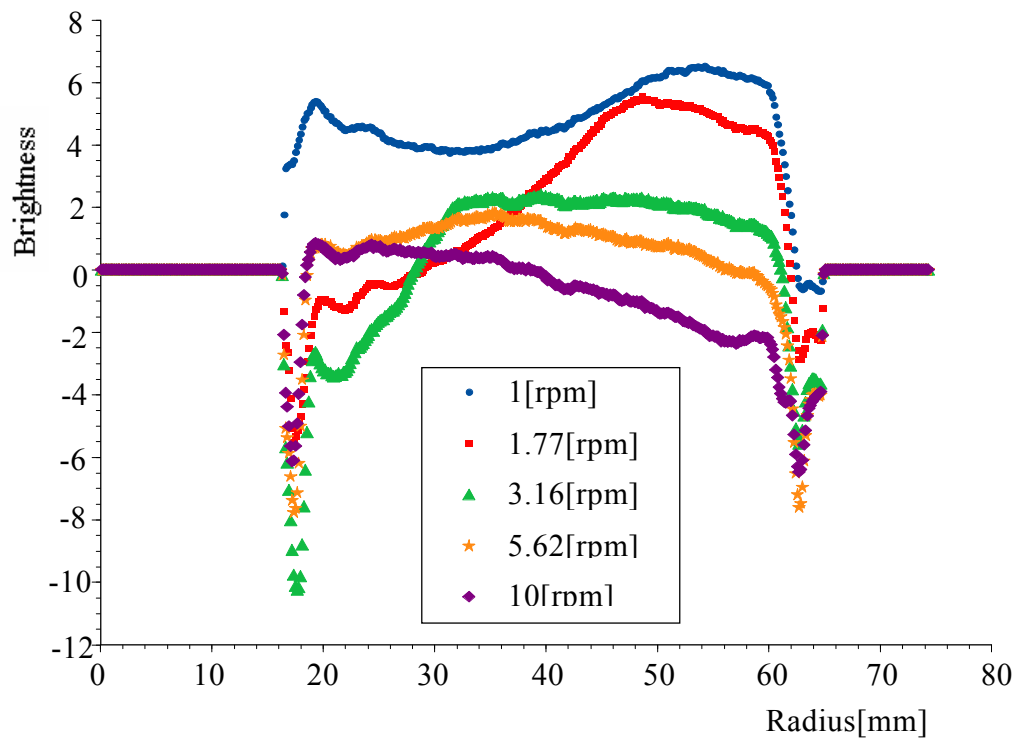


Fig.3.11 Brightness for radius position at each revolution

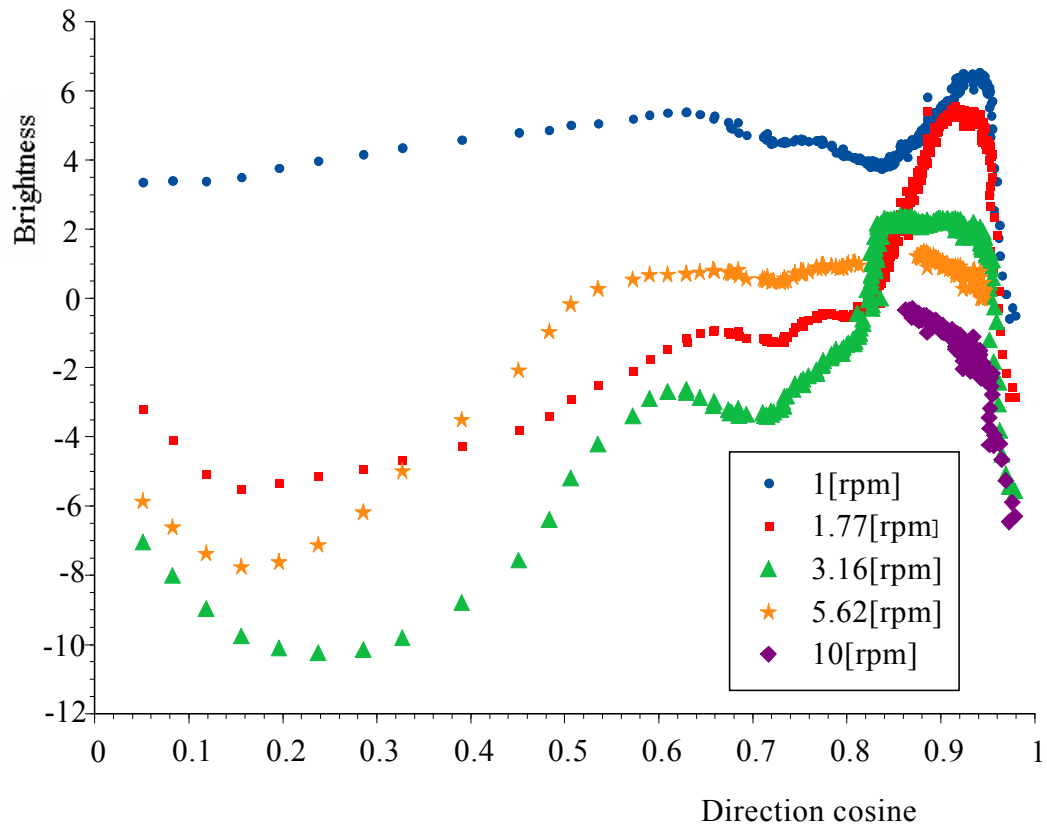


Fig.3.12 The relationship between brightness and orientation of kalliroscope

第 4 章

カリロスコープ粒子を用いたポンプ内部 流動の可視化

4.1 緒言

前章で、カリロスコープ粒子の特性について幾つかの知見を得た。カリロスコープ粒子は板状の微粒子であり、せん断ひずみ速度方向に配向すること。及び、カリロスコープ粒子による反射光は投影面積が広いほど輝度が大きく、狭いほど輝度が小さくなり、反射光はひずみ速度方向によって変わることである。

本章ではカリロスコープ粒子を作動流体として用い、トロコイドギヤポンプの内部流動構造の解明に取り組む。

4.2 カリロスコープ粒子の可視化実験

4.2.1 実験装置および実験条件

Fig.4.1 に実験装置の概略図、Table4.1 に実験条件を示す。実験装置および方法については第 2 章で説明したが、さらに作動流体を流す際に現実に近い条件を付け加えた。作動流体の流量調節のために圧力ヘッドを与えることにした。これは、今回可視化モデルとして製作したポンプの仕事効率が低く、単体では流量に限度があるためである。そのために、ポンプの上方 400mm の位置に溶液タンク (2.2L) を設け、ホースでポンプの流入口と繋いだ。また、ポンプの流出口に繋いだホースには流量調節用のバルブを取り付けて、ポンプ内部の圧力を調整できるようにした。撮影は光源に白色光であるメタルハライドランプ (HVC-SL 出力: 125 W) を 3 機用い、可視化モデルの上方斜め 45 度の位置で、周方向に 120 度ずつ等間隔に配置した。カメラは、高速度カメラ (FASTCAM-MAX) を可視化モデルの外側ギヤ回転中心軸の延長線上 550mm に設置、カメラのレンズには焦点距離 50mm

のレンズ (TEC-M55, 1:2.8) を用いた。この光照射条件では、理論上、カリロスコープ粒子の長辺がギヤの回転面に対して 22.5 度に配向するとき、カメラ側に強い光を反射させる。ただし、実際の粒子は形状やサイズに分散があるため、より広い角度のレンジで反射をもたらす。したがって大雑把に言えば、粒子がギヤの回転面に対して平行な配向をもつ領域では画像輝度が大きくなり、回転軸に平行な配向をもつ領域では画像輝度が小さくなる。この相対的な画像輝度の差により流動構造が画像輝度情報に反映される。例えば、流体がギヤ回転軸成分の渦度をもつ領域では相対的に輝度が低下し、黒い筋や斑点をもたらす。

実験条件は Re 数が 300～10000 の範囲を扱った。またこの他に式(4.1)で定義される容積効率 η をパラメータとして考慮した。

$$\eta = \frac{Q}{Q_0}, \quad Q_0 = (A_o - A_i)h \frac{\omega}{2\pi} \quad (4.1)$$

ここで Q は実際に吐出する流体の体積流量、 Q_0 は理論流量である。 Q_0 は外側ギヤと内側ギヤのトロコイドギヤの閉曲線が作る内包面積 A_o と A_i 、ならびにギヤ回転軸方向の幅 h 、内側ギヤの角速度 ω の関数で与えられる。容積効率はトロコイドギヤポンプのギヤのクリアランスがゼロのとき差圧に無関係に $\eta=1$ となり、いわゆる完全な容積形ポンプとして機能する。しかし実際にはクリアランスが設けられており、差圧が大きいとき 2 つの流体密閉室間で漏れが生じ、 $\eta < 1$ となる。このため Re 数だけでなく η を第 2 のパラメータとして考慮する。本研究では η について 0～1 の条件を扱った。尚、作動流体は Kalliroscope AQ1000 を含んだ水で、カリロスコープ濃度は水に対して 5%mass、温度は 5～10℃である。

実験手順は、ポンプをステップモータの入力周波数を変化して、内側ギヤを 1～136rpm の範囲で、時計回りに回転させた。上記の照明下で、カメラのフレームレート 60～125FPS、シャッター速度 1/21000s で撮影した。流量はポンプ出口側に設けた弁の開閉によって調節した。撮影された画像は、BMP 形式、1024×1024 pixel のグレースケールとして、カメラに接続した PC 内のハードディスクに記録した。本実験では条件ごとに、6144 枚の画像を計測した。実験条件を Table4.2 にまとめた。

4.2.2 実験結果

Fig.4.2 に $\eta=1$ で Re 数が 300～27000 の範囲のカリロスコープによる可視化写真を示す。

この可視化においては内側ギヤが 1 回転する間に、同じ流体密閉室形状が 4 回現れるが、**Re** 数依存性を判定するために同じ位相角のものを抽出して掲載した。同図では内側ギヤと外側ギヤはともに時計回りに回転しており、流体も時計回り方向に輸送される。同図より以下のことがわかる。

- 全体に共通して、ギヤの表面近傍では黒く薄い層が存在する。すなわち、ギヤ表面近傍で流体にせん断が与えられ、せん断層が発生する。
- クリアランス部（内外ギヤがほぼ接触する点）の近傍では周方向に伸びる黒い筋状の模様が現れる。これはクリアランス部における内ギヤと外ギヤの相対速度により新たにせん断層が放出されていることを示す。
- **Re** 数が 1000 以下の条件では密閉室内の流動様式は上述の 2 つの様式が観察されるだけであるが **Re** 数が 1500 になると、密閉室内において黒い筋が広がりを持ち、3000 以上になると、黒い筋だけではなく円弧状の曲線が現れ、複雑になる。これは密閉室内で渦や乱れが存在することを示している。
- **Re**=10000 以上の場合には、密閉室内の模様は細かい波長の模様の集まりとなり、乱流化する。

ところで上述のような観察結果は、可視化を実施する前の段階では容易には予測できなかった。予測を困難にする要因は複数ある。

第一に密閉室の形状が回転とともに著しく変形することである。流体は密閉室の境界の変形速度分布に依存してポテンシャル変形（連続の条件を満足すべく駆動されるポテンシャル流れ）と粘性せん断変形（壁面近傍のせん断応力分布によって駆動される流れ）が合成したものとなる。この場合の流体挙動はトロコイド曲線の動的な変位に依存しており単純な数式では表現できない。

第二の要因は回転の効果である。密閉室内の流体に渦や噴流などの二次的な流れが一旦生じると、局所的な遠心加速度(u^2/r)に分布が生じ、さらに流れを複雑化させる。

第三の要因は、内外のギヤが異なる回転速度で回転することである。トロコイドギヤポンプの場合では、外側ギヤの回転速度が小さいため、密閉室内の流体は剛体回転ではなく自由渦型に近い回転を伴う。すなわちギヤ全体の回転は流体の渦度（ローテーション）に殆ど寄与しない。この性質は本研究のように歯数の小さいトロコイドギヤポンプにおいて顕在化する（歯数が大きいと内側ギヤと外側ギヤの基底円半径の比が 1 に近くなり剛体回転に近くなる→式(2.4)(2.7)参照）。

4.3 画像解析による統計量分析

4.3.1 画像輝度値の分岐線

取得されたカリロスコープ粒子による可視化画像の時系列データを解析し画像輝度の位相統計量を分析した。得られた画像輝度は物理量ではない。しかし画像に時間的・空間的な変動が生ずることは、流動構造の変化にほぼ対応する。これは粒子散乱光の強弱が粒子の配向に支配されているためである。なお、カリロスコープ粒子は十分な数密度を与えれば空間的に均一に分布する。その数密度の疎密に依存した画像輝度変動は殆ど無視できる。結局、画像輝度の平均と変動は、流動構造の平均と変動に対応付けられ議論できる。

Fig.4.3 は密閉室体積が最大となる瞬間において、その密閉室の重心位置 1 点における画像輝度を多数の周期でサンプリングしプロットしたものである。サンプリング幅は 10 周期分である。Re=250~16000 の範囲でグラフ化した。

この図は丁度、カオス解析で使われる分岐線図に相当する。ただし縦軸が物理量ではなく画像輝度であるため、定性的議論に留めなければならない。同図より、Re<1600 の範囲では画像輝度の分散が小さく、周期ごとの流動の再現性が高いことがわかる。これに対して Re>2000 では急激に分散が拡大している。このように分散値が急に増加するという視点で判断すれば、トロコイドギヤポンプにおける流体の乱流遷移は Re=1600~2000 の範囲で起こっていると言える。

4.3.2 画像輝度分布の位相統計

一方、トロコイドギヤポンプ内の流体運動は複雑であり、乱流遷移のトリガーが何であるかについては容易に説明できない。今度は、取得された二次元画像輝度分布全体に対して位相統計を行い、詳細な流動構造の分析を実施した。

画像輝度の平均と変動成分の RMS (Root Mean Square)

ポンプ全体のカリロスコープ粒子画像から、画像輝度の同位相での平均と変動成分の RMS を求める。RMS は画像輝度値のバラつき（偏差）を示す。カリロスコープ粒子の反射光がせん断ひずみ速度方向によって変わることは前章で証明されている。画像輝度の平均から、そのひずみ速度方向がわかるが、さらに画像輝度の RMS 値を求めることで、流れ場がどの程度周期性から外れているかを知る事が出来る。カリロスコープ粒子の画像輝

度の定量的な意味については不明な点があるが、偏差自体は数学的事実であるので意味を有する。位相統計における画像輝度変動の RMS 値は、流動の非周期性を評価する指標：cycle-by-cycle instability を意味する。この RMS 値が正の値をもつとき、密閉室間で流れの再現性が損なわれ、同じタイミングでも異なる挙動をもつことを意味する。トロコイドギヤポンプでは各密閉室が完全に独立に仕切られ、流れ場の非線形性がないとき、この RMS 値はゼロである。これに対して密閉室間に漏れがある場合や、乱流遷移が生じた場合には RMS 値が正となる。この RMS は次式で求められる。

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (B_i - \bar{B})^2} \quad (4.2)$$

B_i は計測した各位相での画像輝度、 \bar{B} は全同位相の画像輝度値の平均であり、 N は同位相の総数である。2 章で示したように、本ポンプの場合、内側ギヤが 4 枚歯である。密閉室の位相は、内側ギヤの 1/4 回転する毎で同位相になる。

Fig4.4 に計測した画像から統計的な処理を行う方法を説明する。一連の解析は、平均画像の導出、RMS の計算で構成される。まず、位相統計を行うにあたり、流体が存在する領域のみを統計の対象とするため、ギヤ部および背景を除去し、統計から除外するよう前処理を実施した。この画像に対して、同じ位相角 θ すなわち同じ密閉室形状の瞬間の画像を多数(10 枚以上)サンプリングし、位相を変数とした画像輝度の平均値と変動成分の RMS 値を計算した。平均画像輝度と RMS 値の絶対値それ自体には定量的な意味をもたないが、全条件で得られた結果の最大値と最小値で正規化し、その上で見やすさのためカラーコード (0～255 階調) で表示した。暖色の領域で値が大きく寒色の領域で値が小さいことを示す。

以下のパラメータにおいて、この方法で得られた実験結果を考察する。

位相平均画像輝度分布と RMS 値分布

Fig.4.5～4.13 は $Re=500$, $Re=1580$, $Re=5000$, 容積効率 η が 0, 0.5, 1 の条件における内側ギヤ回転角度 (18 度ごと) の結果を示したものである。いずれも左列はカリロスコープ粒子の画像輝度の平均を示し、右列には RMS 値の結果を示す。尚、容積効率 η はバルブの開閉によって強制的に制御した。 $\eta=1$ が全開、 $\eta=0$ が全閉の条件である。 Re 数については、 $Re=1580$ の条件は前述した Fig.4.3 の画像輝度変動のグラフから、ちょうど乱流遷移の直前である。これらの結果からは、以下のことがわかる。

まず、回転角度による変化であるが、全条件でポンプの出入り口部分で画像輝度の変化が見られる。画像の左側の入り口ポートから流入し、ギヤの回転によりに順次送られて行

き、右側の出口部分から流出する。全閉条件である $\eta = 0$ の場合は、実際には流出入がなく内部循環するだけであるが、同様にこの状態が観察される。これは、Fig.2.6 の c) に示す出入り口に設けたポート部分の水溜り用の溝の影響であると考えられる。全体的な Re 数による違いは、Re=500 ではまだ変化が少なく、1580, 5000 につれて平均値と RMS は大きくなる傾向である。これらのデータは、ギヤの回転位相の違いにより異なる密閉室条件のデータが混在しており、データの比較がしづらい。ここで、位相条件を揃えて Re 数と容積効率 η の比較をする。Fig.4.14~4.16 は、ギヤの位相条件を揃えた結果である。

まず、左列の平均画像輝度分布に注目する。Re=500 では密閉室全体の画像輝度はほぼ一様に近いが、Re=1580 で画像輝度の分布に斑が生じ、Re=5000 ではかなり複雑になっている。Re=1580, 5000 では密閉室内の中央部やや内側より高い値をとるようになる。また、Re=500 では容積効率 η が大きい場合に画像輝度分布のムラがあるが、これに対して Re=5000 では逆に η が小さいほうが画像輝度分布のムラが大きくなる。また、 $\eta = 0$ のアイドル条件でポンプを回転させる場合でも、流動構造は Re 数に依存することが確認された。

次に RMS 値分布に着目する。Re=500 では内外のギヤ表面近傍で若干の変動成分をもつだけである。これに対して Re=1580 の乱流遷移直前の条件では、ギヤ表面近傍と密閉室中央部分の変動が同程度となる。Re=5000 の乱流条件では、密閉室内の中央部分に高い RMS 値が現れる。特に Fig.4.16 の右列の図を注視すると、RMS 値がピークをもつ位置は、各密閉室の上流側であり、明らか逆方向への流れが観察できる。この理由は逆流噴流にある。例えば、 $\eta = 0$ の条件では密閉室の流体が輸送されず、すべて隣接する下流（図の反時計回り方向）の密閉室に漏れる。このとき内外ギヤのクリアランス部には上流に向けて逆流する高速の流れが発生する。この逆流は上流の密閉室内において逆流噴流となり、上流の流れを乱す。RMS 値はこの逆流噴流が周囲とのせん断によって渦生成して生ずる。そのため、逆流噴流にとっての下流、すなわちギヤの回転方向に対して上流の位置で乱れが増大する。なお逆流噴流はギヤの回転とともにその方向が変化するため、乱れが生成される範囲は扇形状に広がっている。一般の回転流体機械においてもこのようなクリアランスからの逆流が主流を乱すことが知られているが、トロコイドギヤポンプの場合、その逆流が、時々刻々と向きを変えながら移動することに特徴である。またターボ形ポンプとは異なり、本来、ギヤ密閉室内では流れが閉じこめられているだけであるが、逆流噴流の生成が、低レイノルズ数域における乱流遷移のトリガーになることが確認された。

4.4 結言

本章ではカリロスコープ粒子を用いたトロコイドギヤポンプの内部流動の可視化を行った。この実験の狙いは、2つのギヤの間隙に形成される流体密閉室が回転し、かつ顕著な変形を伴うときに内部流動がどのような流動パターンを持つかを把握することである。

レイノルズ数 (Re) と容積効率 (η) の2つをパラメータとして、カリロスコープ粒子を用いた可視化により、以下の結論を得た。

- 摺動部およびギヤ接触部を含むような容積形ポンプの可視化を実現するために、耐摩耗性と透明性を同時に確保する材料を利用した。その上で幾つかのトレーサ粒子による可視化試験を実施し、カリロスコープ粒子をトレーサとして選定した。この粒子による可視化の結果は、トロコイドギヤポンプ内部のせん断や渦・乱れなどの構造を定性的に把握するのに十分な画像品質をもつことが示された。
- 可視化された時系列画像を位相統計することにより密閉室内の流動構造のレイノルズ数依存性、容積効率依存性が明らかとなった。具体的には $Re=1600\sim 2000$ において流れが乱流遷移すること、この乱流化の主要因がギヤのクリアランス部から上流側に向けて逆流する噴流であること、などである。

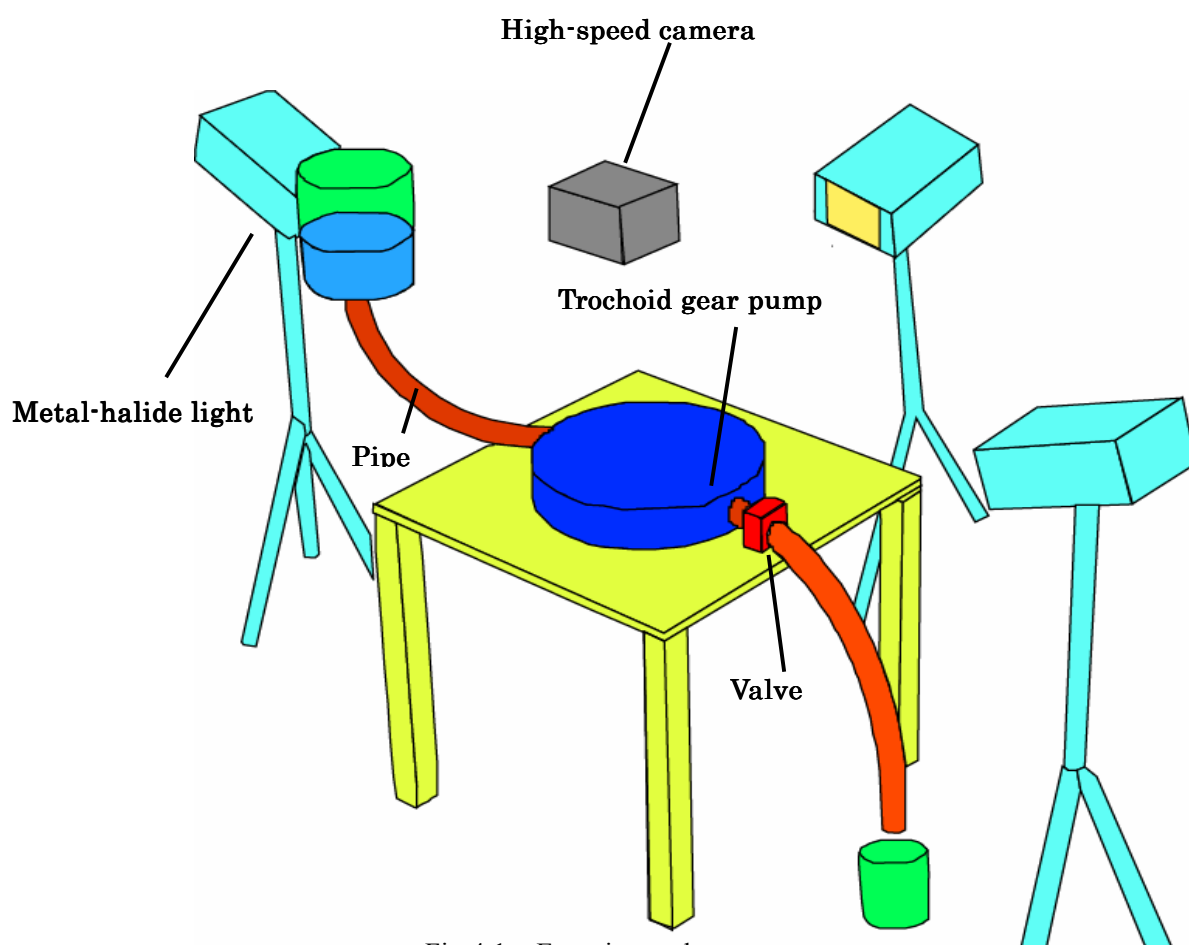
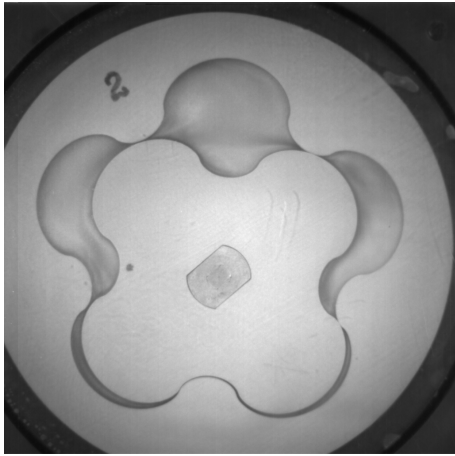


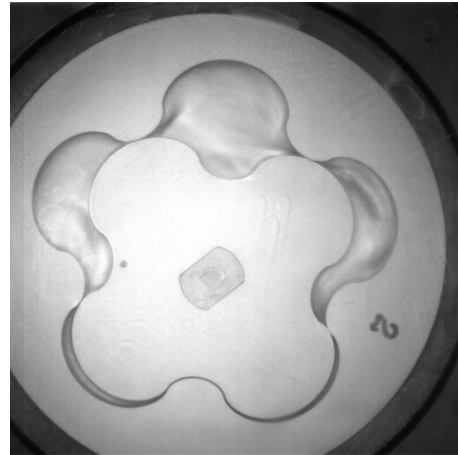
Fig.4.1 Experimental apparatus

Table 4.1 Experimental conditions

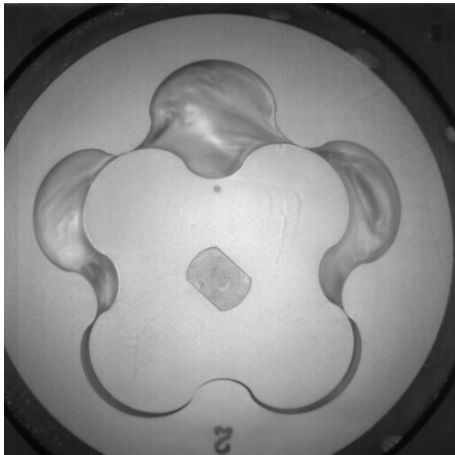
Flame rate	60~125 FPS
Shutter speed	1/21000s
Kalliroscope rate	5[%]
Rotating speed	1~136rpm
Density	1000kg/m ³
Kinematic viscosity	$1.519 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$
Temperature	278k
Reynolds number	250~16000[-]
Flow rate	0~1[-]



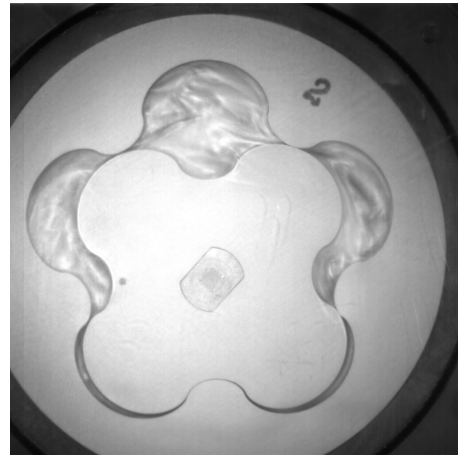
Re=300



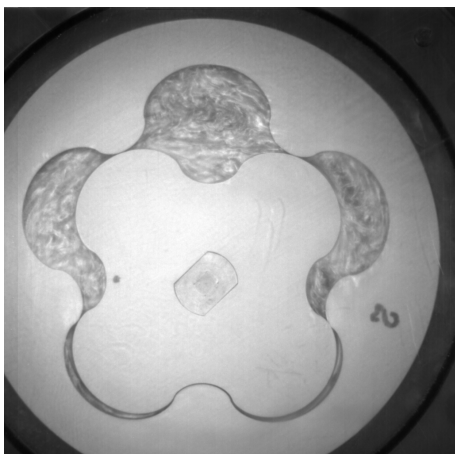
Re=1000



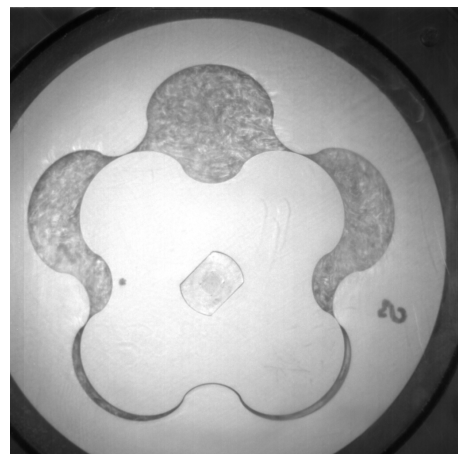
Re=1500



Re=3000



Re=10000



Re=27000

Fig.4.2 Visualization results at $\eta=1$

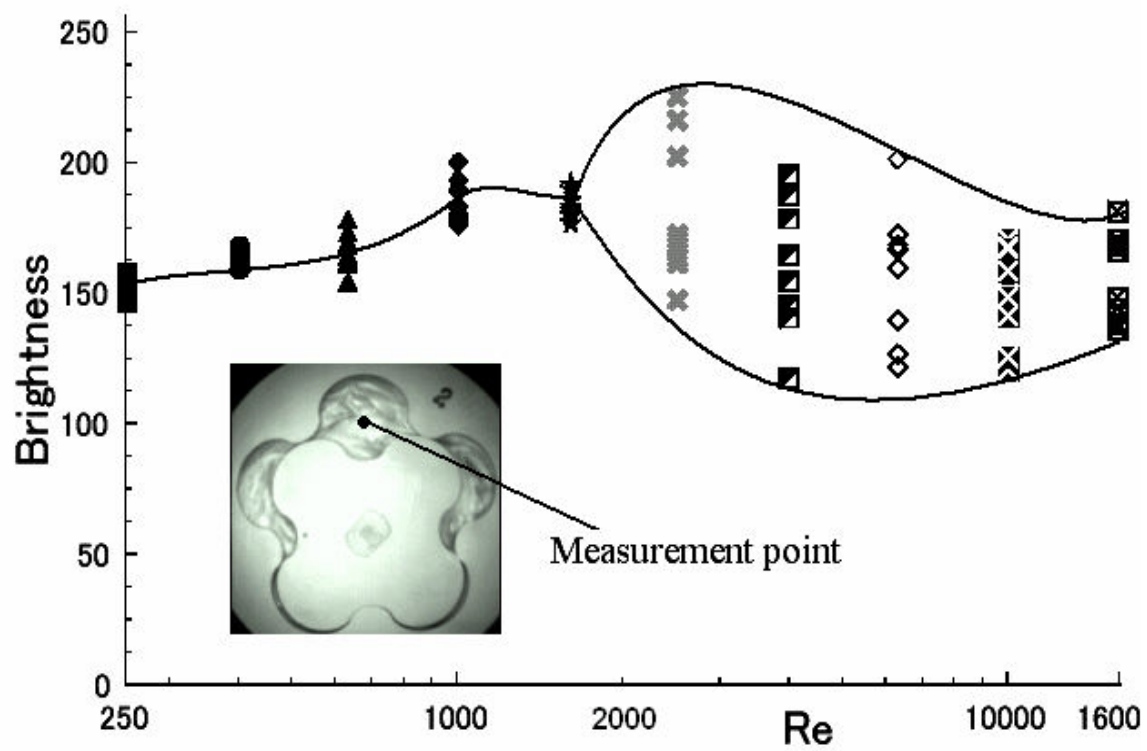
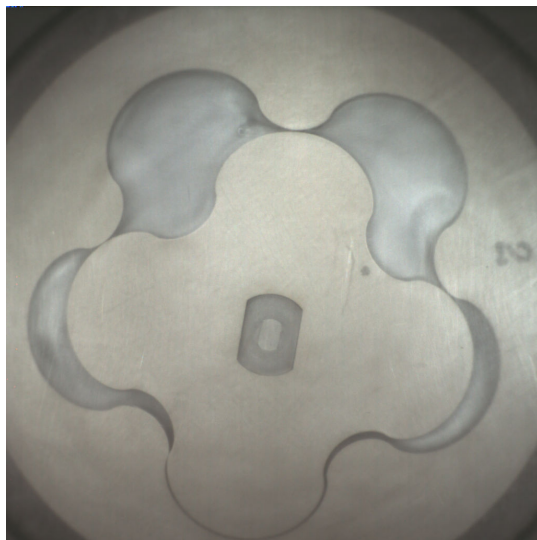


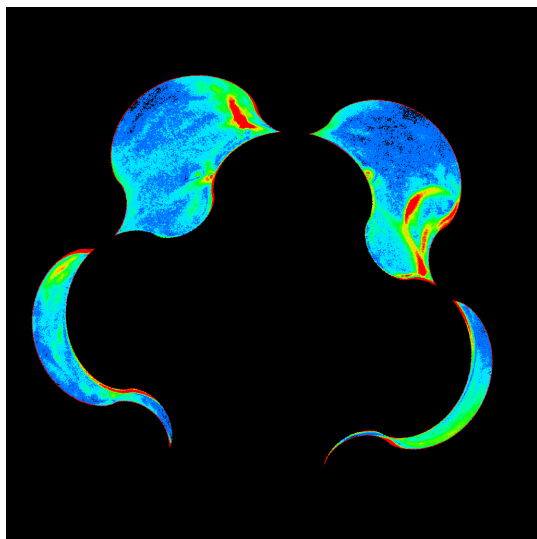
Fig.4.3 Cycle-by-cycle fluctuation of local brightness



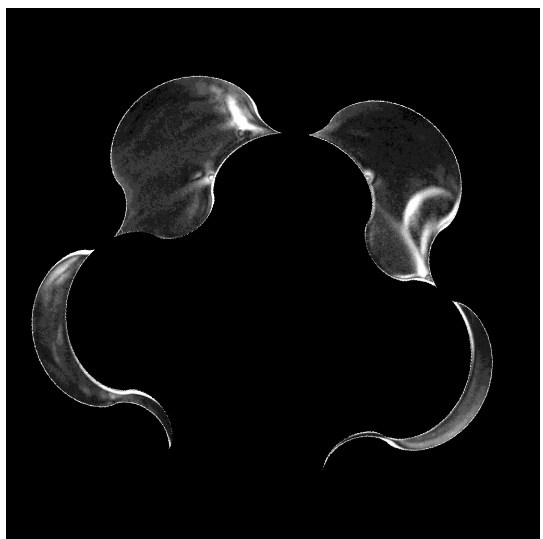
Raw image of Kalliroscope



Average of brightness



R.M.S. of the brightness at the color raw image



R.M.S. of the brightness at the raw image

Fig.4.4 Flow chart of image analysis

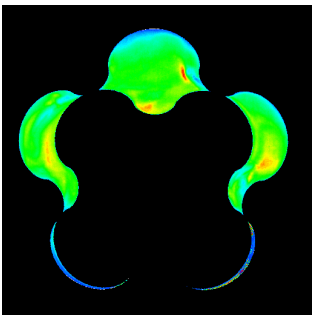
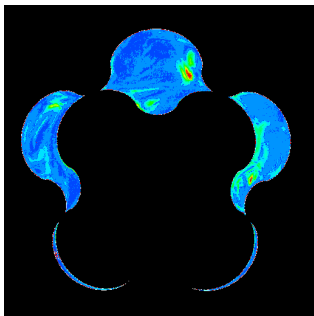
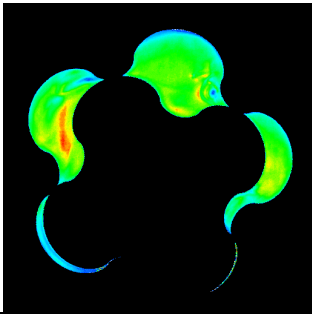
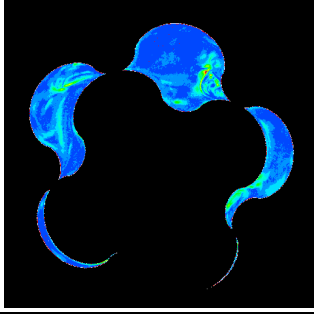
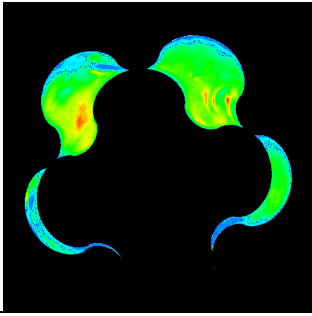
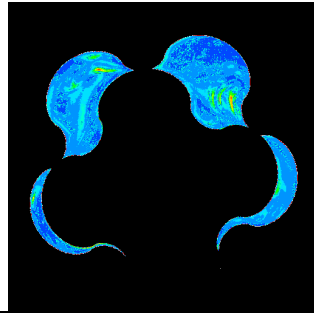
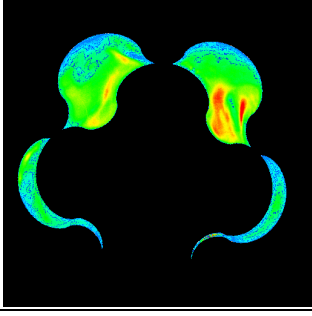
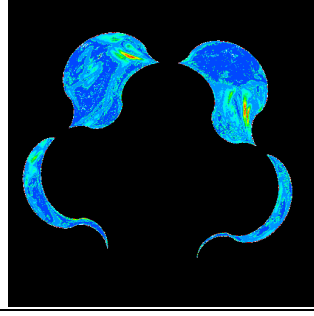
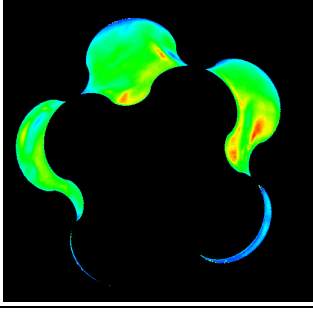
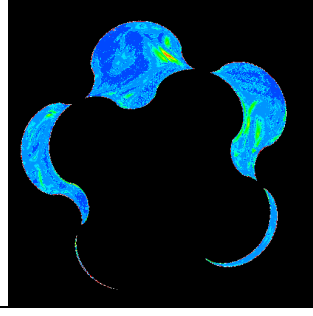
	Average	RMS
$\theta = 0^\circ$ 90°		
$\theta = 18^\circ$		
$\theta = 36^\circ$		
$\theta = 54^\circ$		
$\theta = 72^\circ$		

Fig.4.5 Average and RMS of brightness in each angle ($Re=500, \eta=0$)

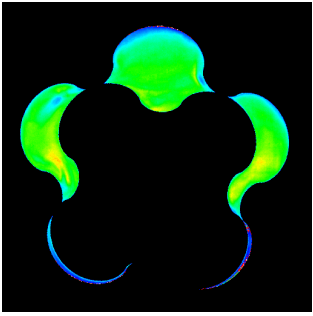
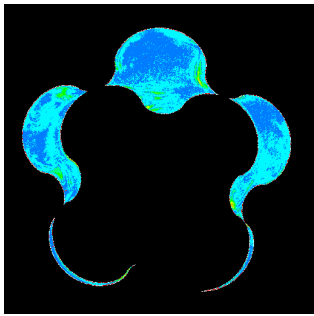
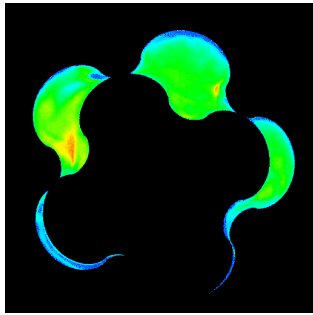
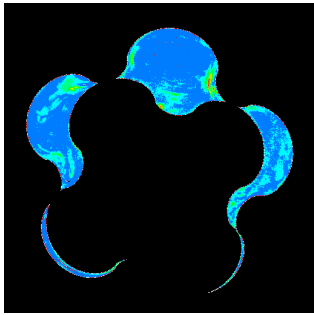
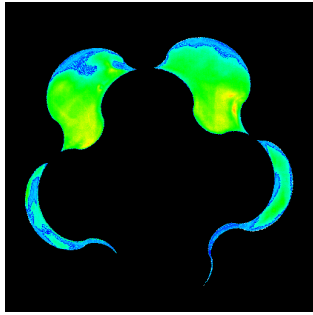
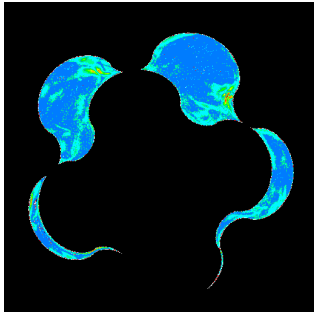
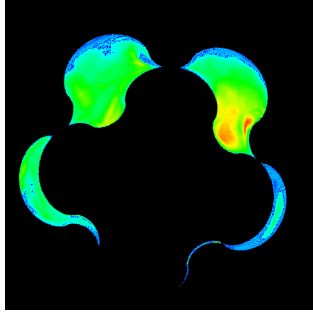
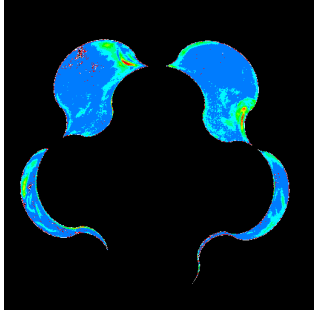
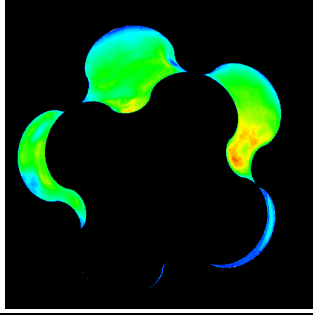
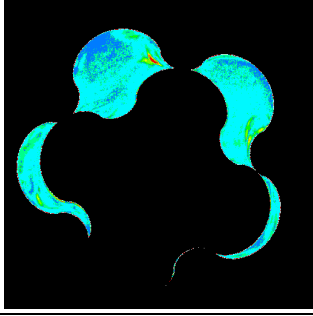
	Average	RMS
$\theta = 0^\circ$ 90°		
$\theta = 18^\circ$		
$\theta = 36^\circ$		
$\theta = 54^\circ$		
$\theta = 72^\circ$		

Fig.4.6 Average and RMS of brightness in each angle ($Re=500, \eta=0.5$)

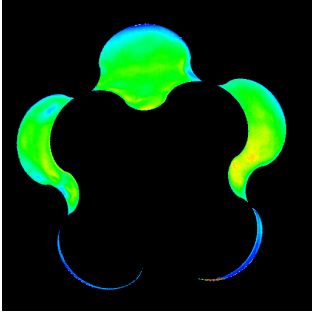
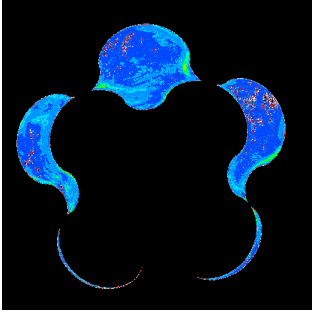
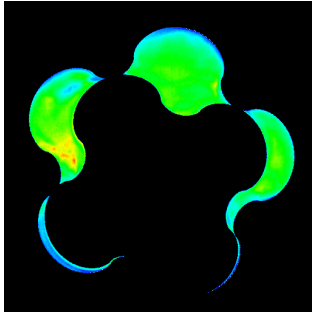
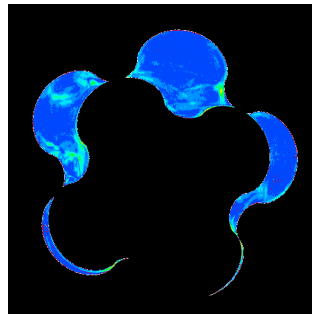
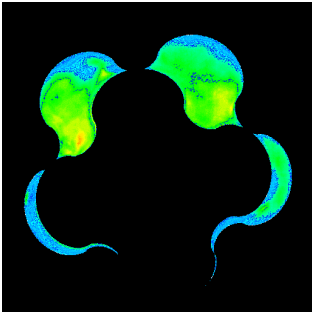
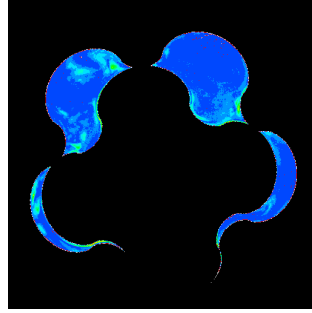
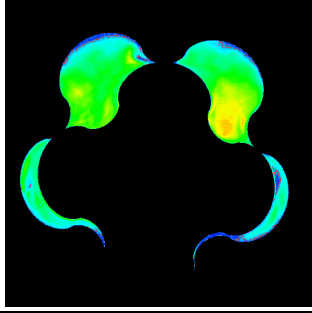
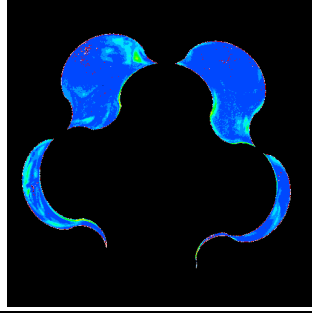
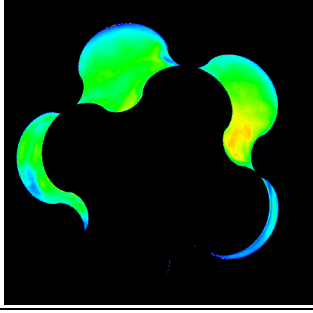
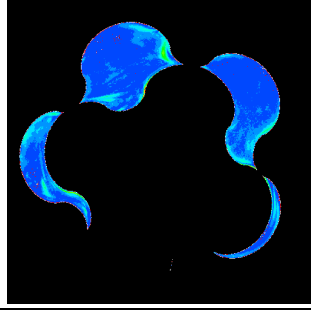
	Average	RMS
$\theta = 0^\circ$ 90°		
$\theta = 18^\circ$		
$\theta = 36^\circ$		
$\theta = 54^\circ$		
$\theta = 72^\circ$		

Fig.4.7 Average and RMS of brightness in each angle ($Re=500, \eta=1.0$)

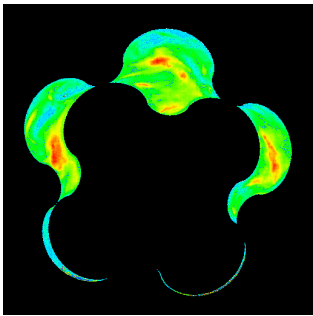
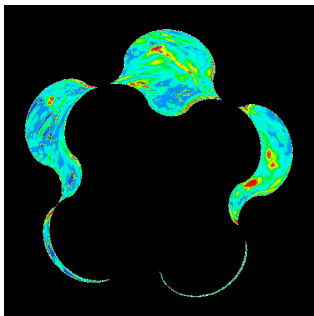
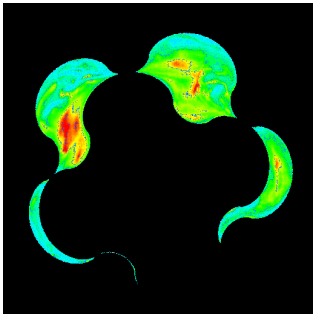
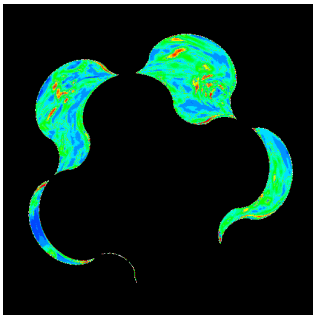
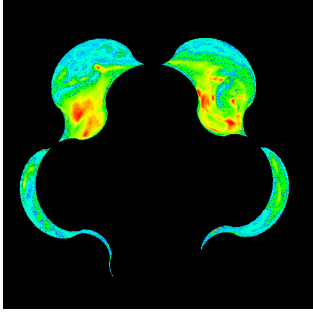
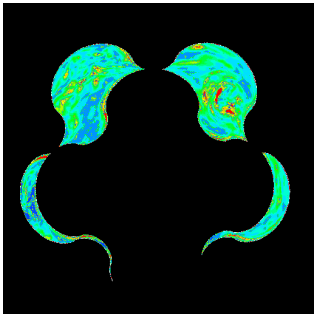
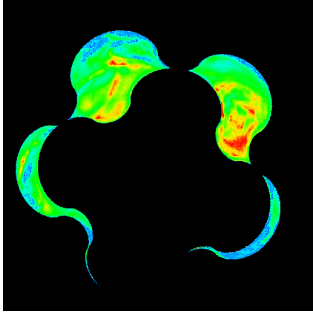
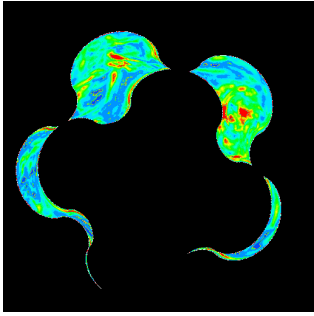
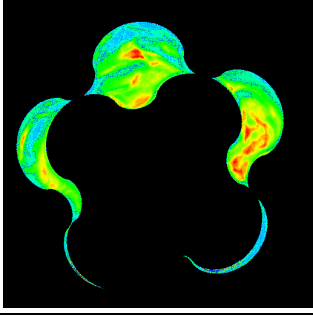
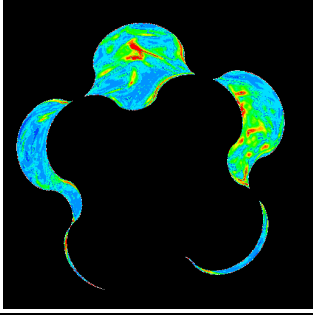
	Average	RMS
$\theta = 0^\circ$ 90°		
$\theta = 18^\circ$		
$\theta = 36^\circ$		
$\theta = 54^\circ$		
$\theta = 72^\circ$		

Fig.4.8 Average and RMS of brightness in each angle ($\text{Re}=1580, \eta=0$)

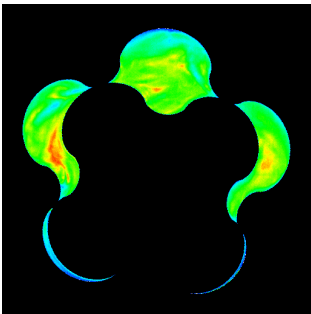
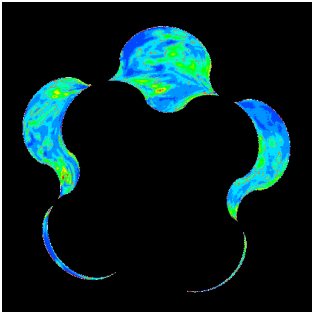
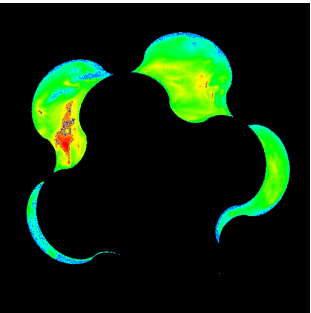
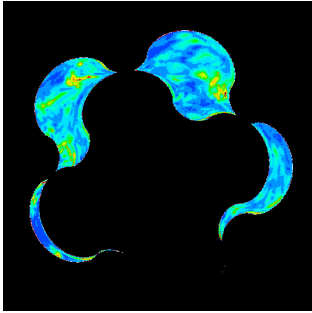
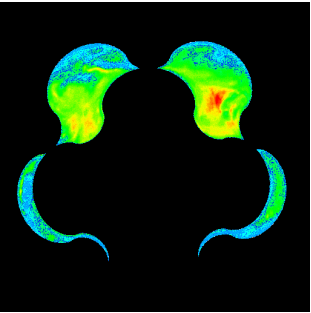
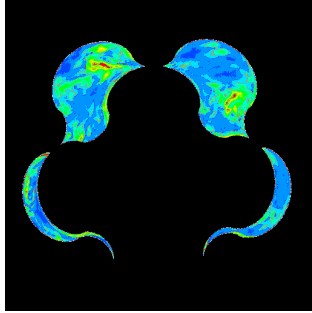
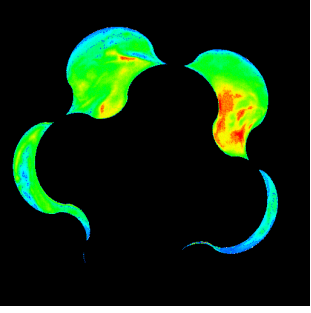
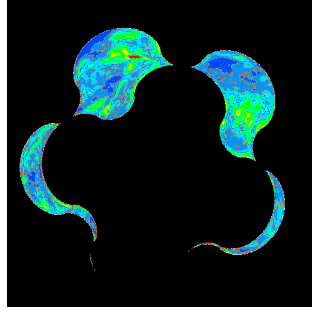
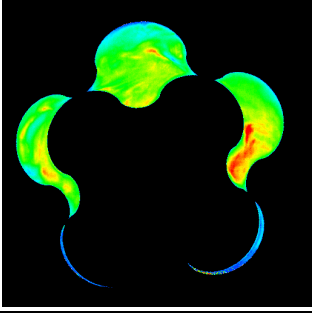
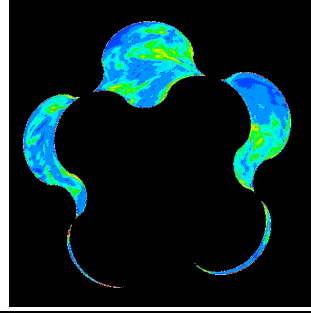
	Average	RMS
$\theta = 0^\circ$ 90°		
$\theta = 18^\circ$		
$\theta = 36^\circ$		
$\theta = 54^\circ$		
$\theta = 72^\circ$		

Fig.4.9 Average and RMS of brightness in each angle ($Re=1580, \eta=0.5$)

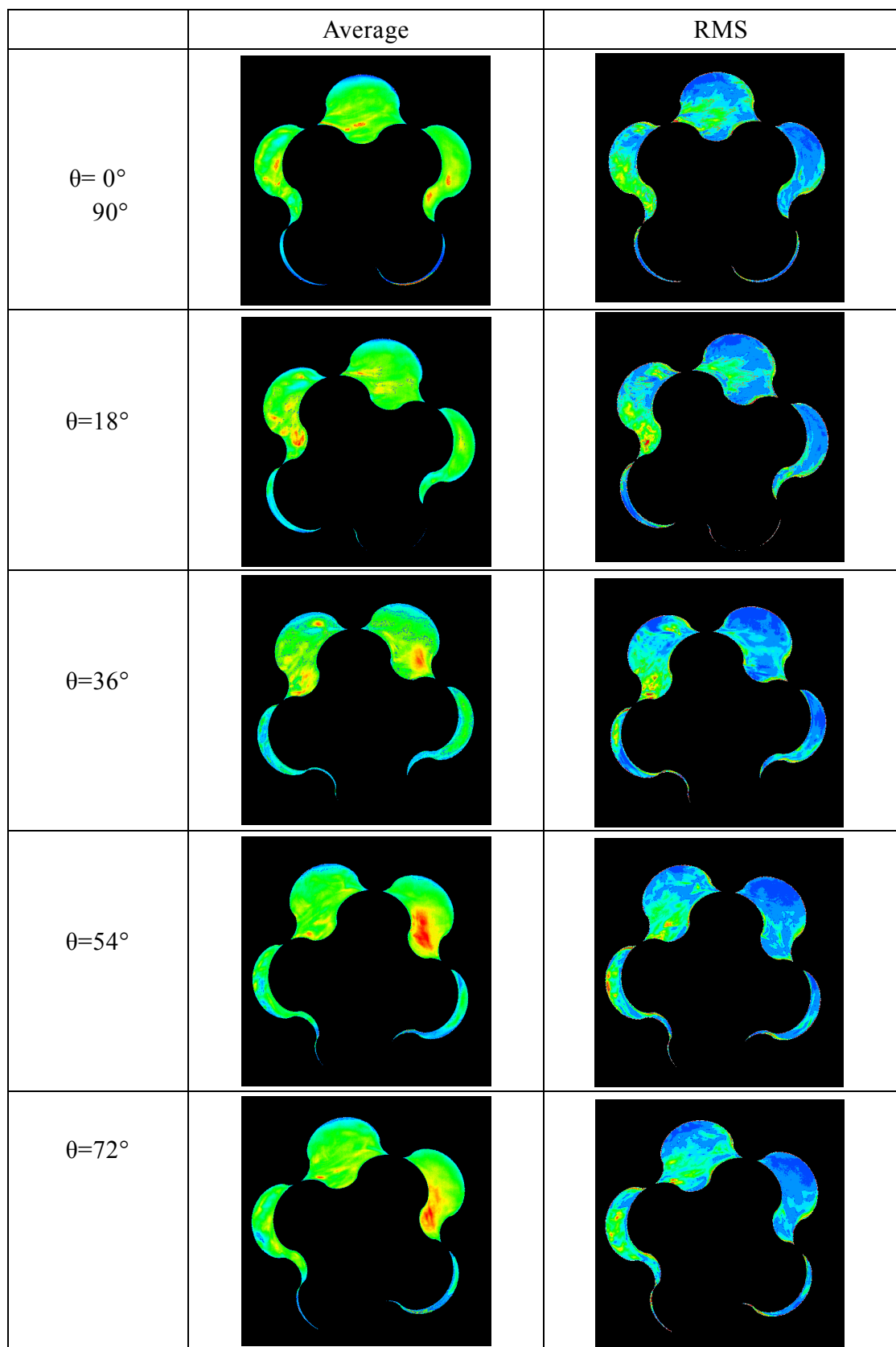


Fig.4.10 Average and RMS of brightness in each angle ($Re=1580, \eta=1.0$)

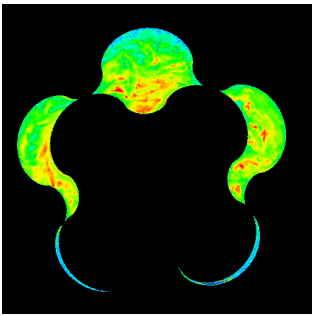
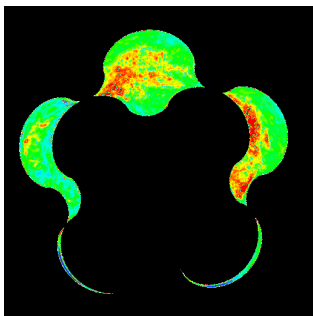
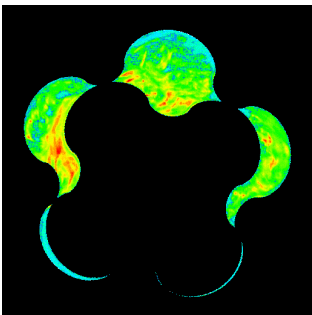
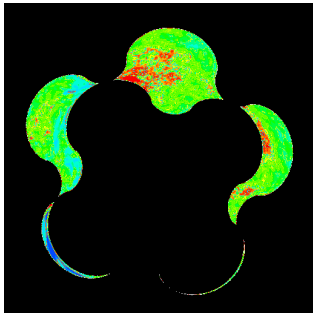
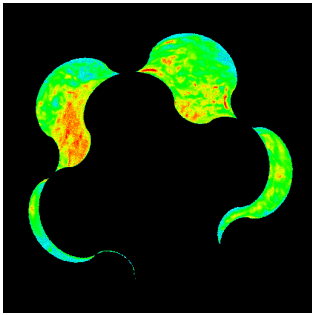
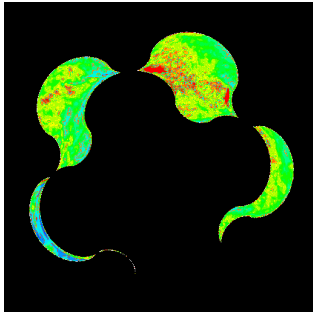
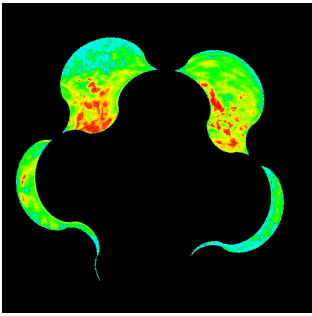
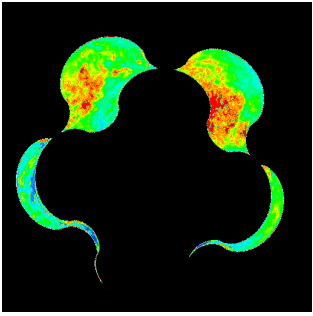
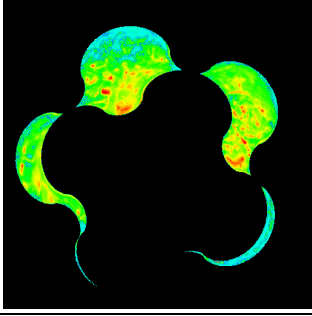
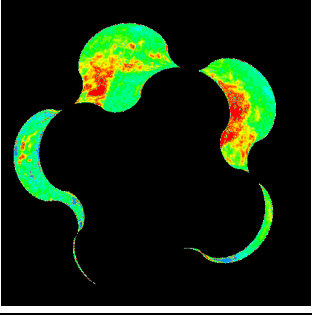
	Average	RMS
$\theta = 0^\circ$ 90°		
$\theta = 18^\circ$		
$\theta = 36^\circ$		
$\theta = 54^\circ$		
$\theta = 72^\circ$		

Fig.4.11 Average and RMS of brightness in each angle ($Re=5000, \eta=0$)

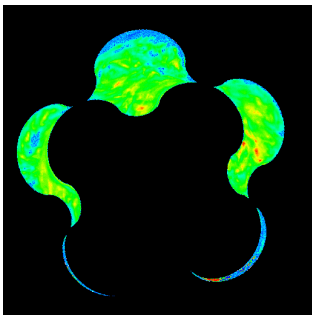
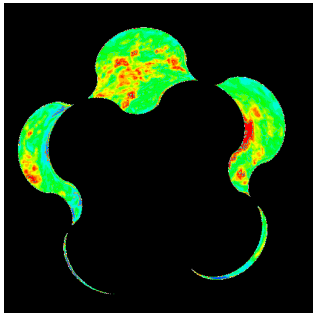
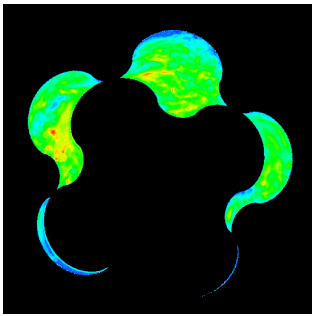
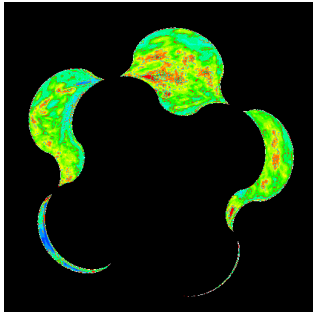
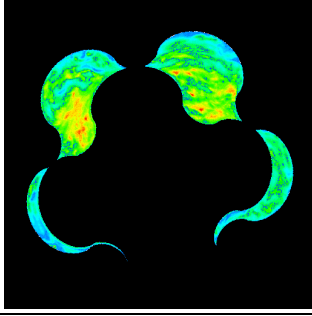
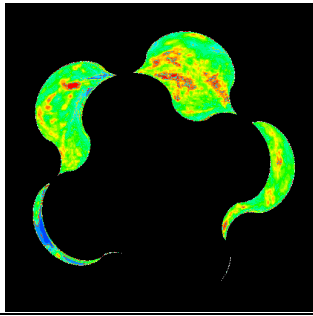
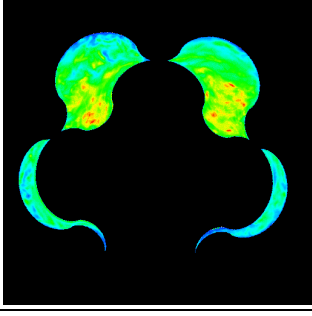
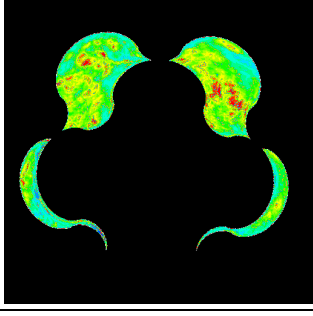
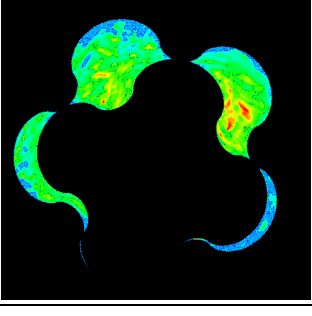
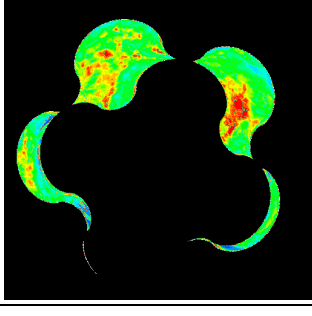
	Average	RMS
$\theta = 0^\circ$ 90°		
$\theta = 18^\circ$		
$\theta = 36^\circ$		
$\theta = 54^\circ$		
$\theta = 72^\circ$		

Fig.4.12 Average and RMS of brightness in each angle ($Re=5000, \eta=0.5$)

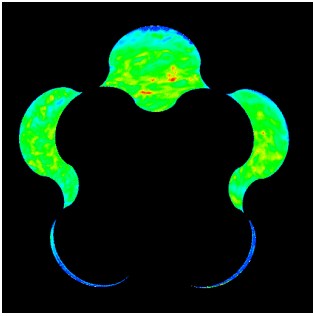
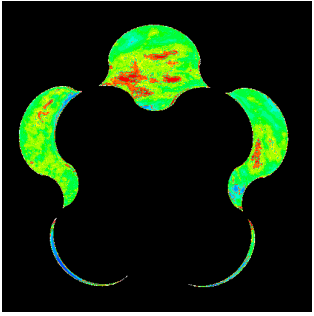
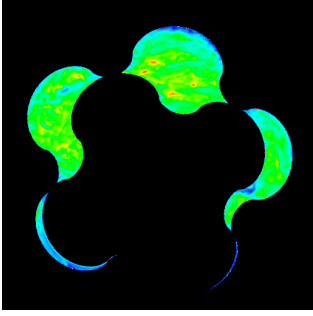
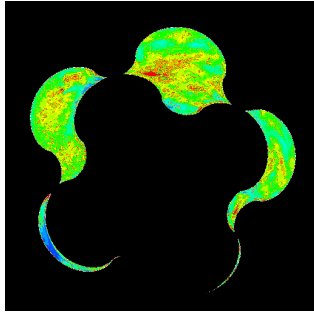
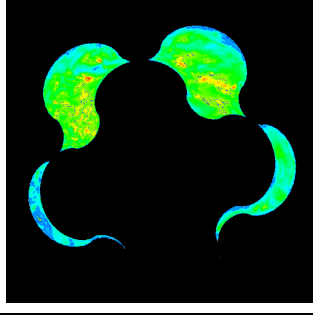
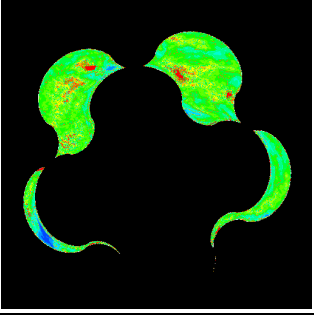
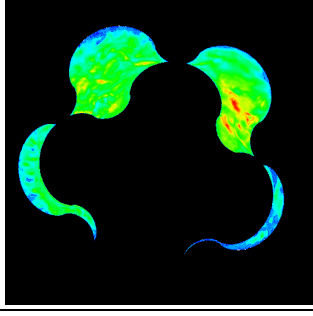
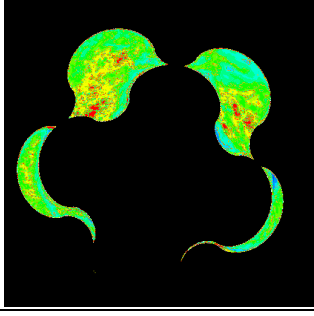
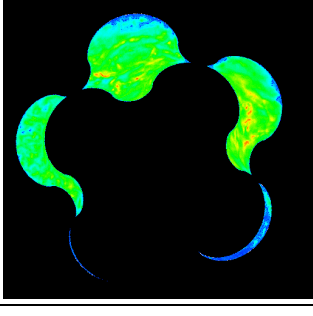
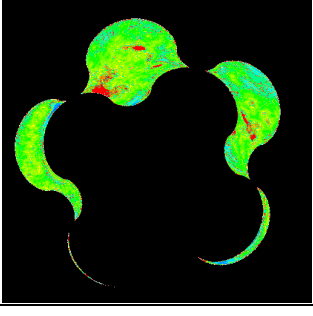
	Average	RMS
$\theta = 0^\circ$ 90°		
$\theta = 18^\circ$		
$\theta = 36^\circ$		
$\theta = 54^\circ$		
$\theta = 72^\circ$		

Fig.4.13 Average and RMS of brightness in each angle ($Re=5000, \eta=1.0$)

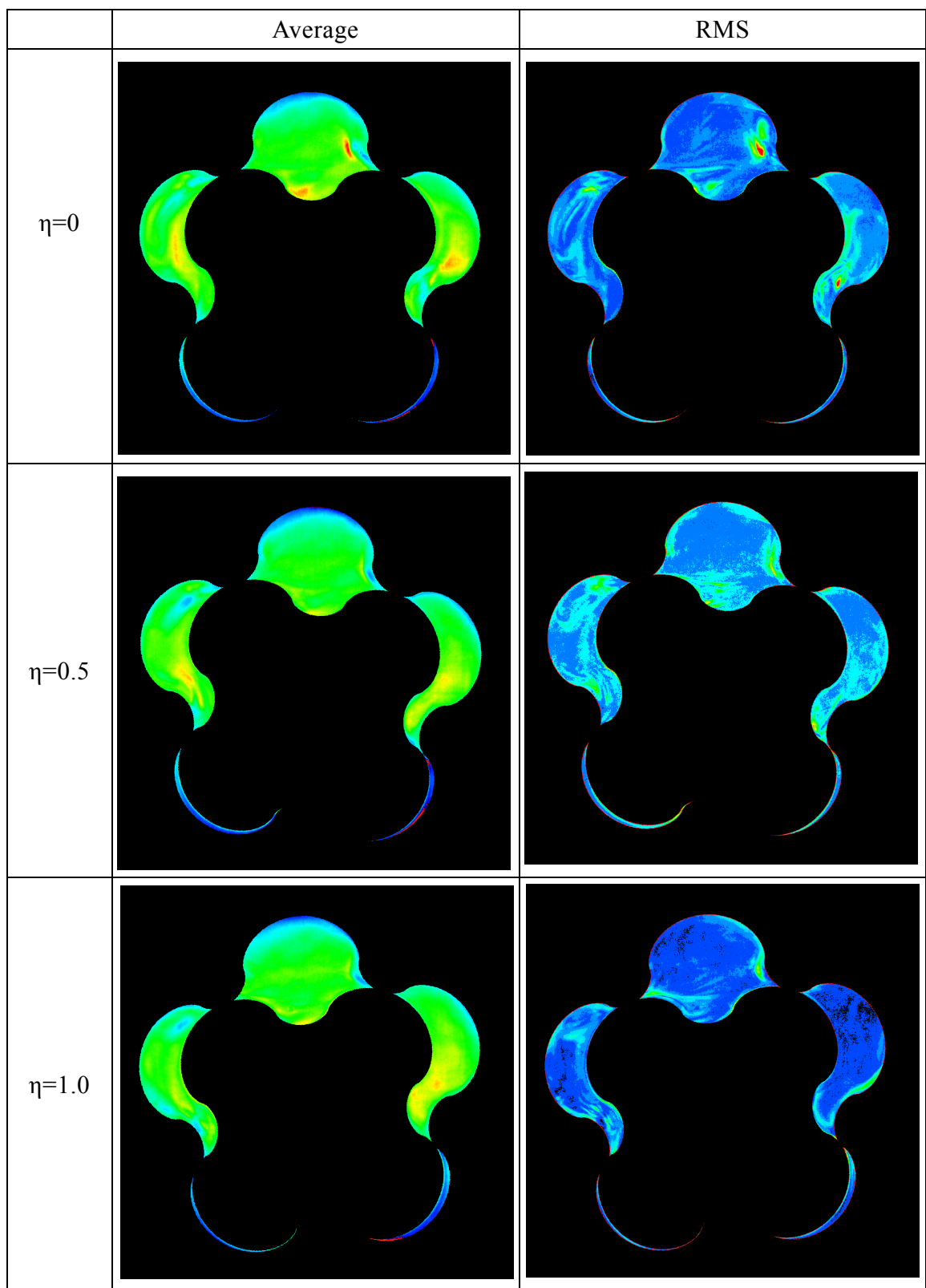


Fig.4.14 Average and RMS of brightness at $Re=500$

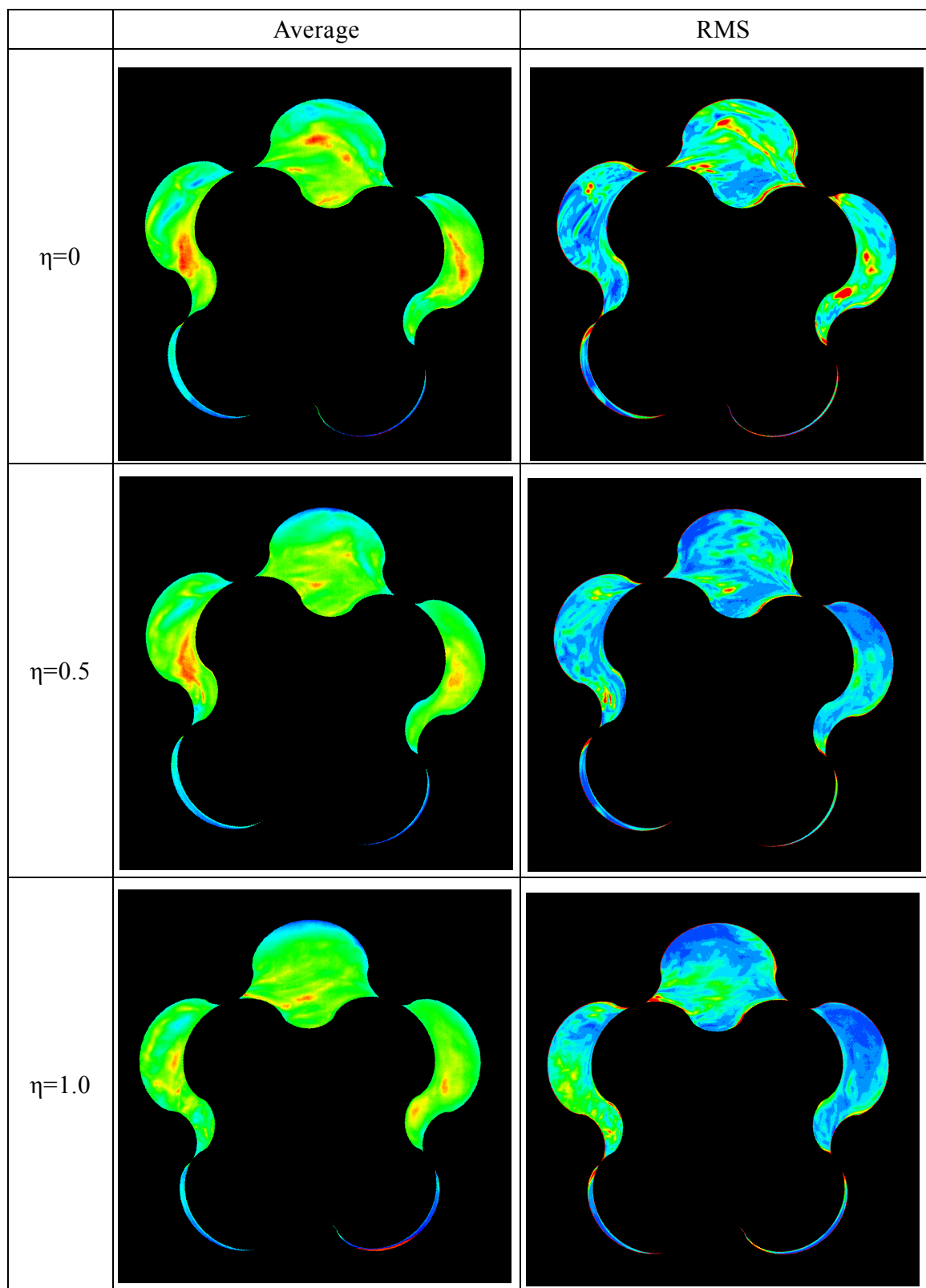


Fig.4.15 Average and RMS of brightness at $Re=1580$

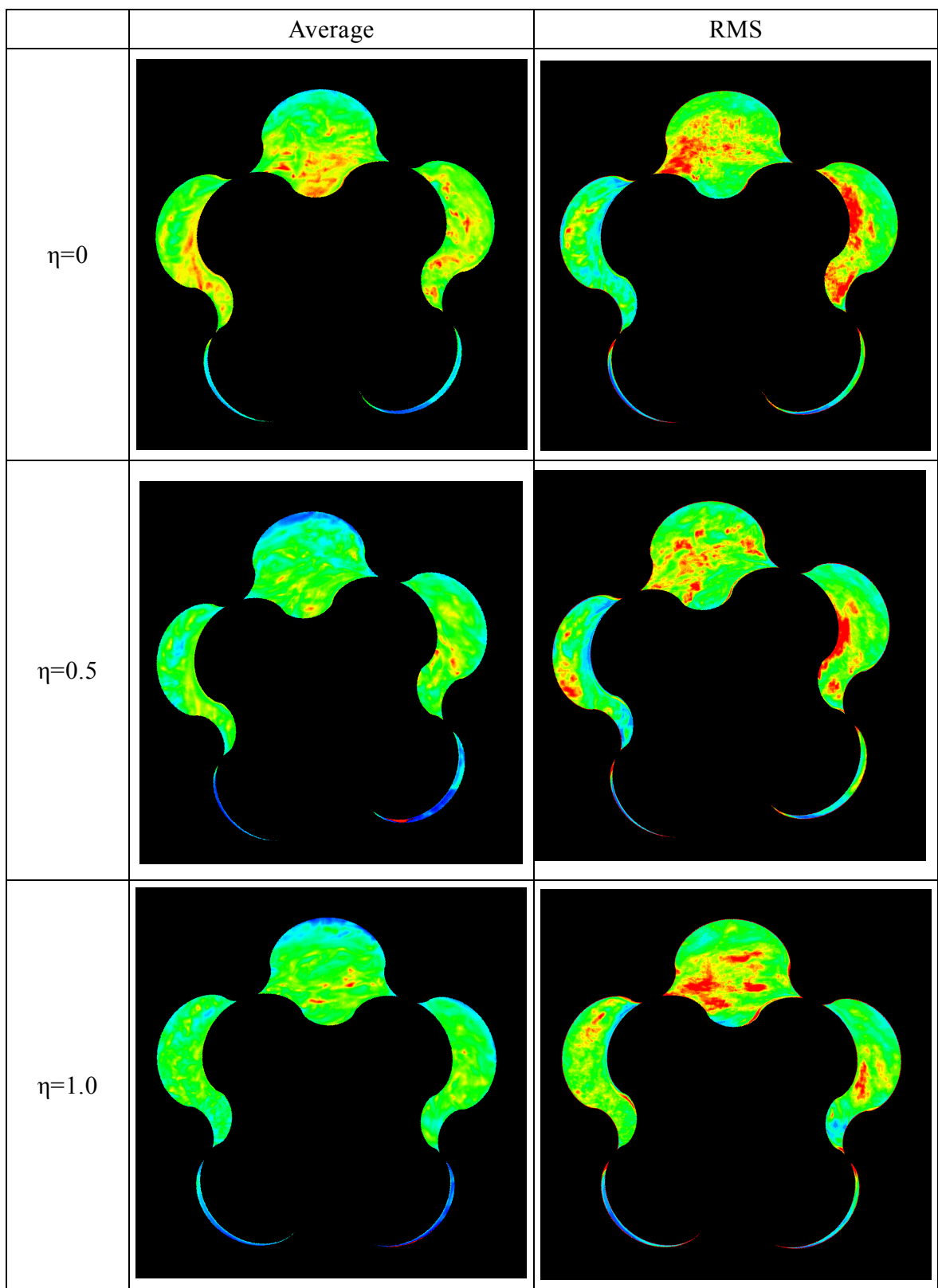


Fig4.16 Average and RMS of brightness at $Re=5000$

第 5 章

トロコイドギヤポンプの性能改善検討

5.1 緒言.

トロコイドギヤポンプの流動を可視化することにより，トロコイド形状の歯形を持つ内接形ギヤポンプの流動に関する知見を得られた．ここで実用化を目指して実際に小形トロコイドギヤポンプを製作し，そのポンプ性能を確認する．

トロコイドギヤポンプの製作にあたっては，手のひらに乗るサイズ（サイズとしては 30mm 程度）で，損失低減，いわゆるポンプの効率を向上させることを目的にする．トロコイドポンプの内部は，Fig2.3 に示すようにポンプとしての接触点以外に，摺動する箇所（Fig.2.3 で δ ）が多く，この部分の損失が大きい．したがってこの部分の摺動抵抗を低減することは，効率向上させるための有効な方法になる．そこで，摺動箇所の一部であるが，ポンプケースのギヤと対向する面に動圧を発生する溝を設け，スラスト部の損失を低減する．この動圧溝を設けたことによるポンプ性能への影響について，実験と考察を行う．

5.2 小形トロコイドギヤポンプの製作

5.2.1 ポンプの構成

Fig.5.1 に製作したトロコイドギヤポンプの写真を，Fig.5.2 には製作したトロコイドギヤポンプの断面図を示す．ポンプの流れの方向を Fig.5.2 の断面図の上に示すが，流入口から流入した流体がポンプ室内部で昇圧されて，同一面内 180 度対称位置にある流出口から流出する構成である．この流入，流出口と逆の面には，動圧を発生させるスパイラルグループ軸受^[25]を設けてある．Fig.5.3 は使用したギヤの外観写真と図面である．ギヤの材料は，加工性に優れ強度も期待できる PPS（Poly Phenilen Sulfide）樹脂を用いる．トロコイドギヤとしての概略仕様を Table5.1 にまとめるが，外側ギヤは歯数 5 枚，基円直径 $\phi 9.59\text{mm}$ ，内側ギヤの歯数は 4 枚，基円直径 $\phi 7.68\text{mm}$ ，歯厚は 4mm である．両ギヤは回転軸を 0.96 mm 偏心して配置される．Fig.5.4 には動圧スパイラル軸受の写真を，Fig.5.5 にインボリュ

ート曲線で製作した溝形状仕様を示す。スパイラル軸受部は SUS304 材にスパイラル動圧溝をエッチングして製作する。溝部の径は $\phi 8.9\text{mm}$ ，溝深さは $7\mu\text{m}$ ，溝本数 6 本である。

5.2.2 ポンプの性能

実験装置と実験方法

ポンプ性能を測定するシステム構成を Fig.5.6 に示す。ポンプの中心軸にモータを接続して、モータの回転数をコントロールし、ポンプ性能を測定する。モータはトルク定数が $38.7\text{mN}\cdot\text{m}/\text{A}$ の DC モータで、DC15V 印加時のモータ無負荷回転数は 3390rpm，始動トルク $11.1\text{mN}\cdot\text{m}$ ，始動電流 313mA である。トロコイドギヤポンプの流入，流出口には圧力計（コパル電子 PG-35）を接続，ポンプ流量を測定するために流量計を接続する。また差圧 H と流量 Q の関係を調べるために，流量を調整する流量調整弁を流路に設けて，ポンプに負荷を与えた場合の流量性能を確認する。トロコイドギヤポンプの回転数の計測方法は，シャフトに検出用の磁石を取り付け，磁気センサ（ホール素子）で検出することにより測定する。ポンプが回転することで，発生する 1 回転 1 パルスの出力を利用して回転数をカウントする。モータの入力測定はモータの駆動する電圧と電流を測定する。流体は水(20°C)を使用する。

ポンプ効率

ここで，ポンプが発生する差圧を $H(\text{Pa})$ ，吐出し流量を $Q(\text{m}^3/\text{s})$ ，流体の密度を $\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$ とすると，流体がポンプから受け取った単位時間あたりのエネルギー $P_{out}(\text{W})$ は

$$P_{out} = \rho g Q H \quad (5.1)$$

である。ポンプ効率 $E_p(\%)$ はポンプを駆動するモータの回転数 N (rps) とトルク T ($\text{N}\cdot\text{m}$) の積である軸動力から

$$E_p = P_{out} / N T \times 100 \quad (5.2)$$

で求められる。ただし実際にモータを駆動する入力側からみたポンプの総合効率 $E_{total}(\%)$ はモータに与えられる電圧と電流の積である入力 $P_{in}(\text{W})$ から

$$E_{total} = P_{out} / P_{in} \times 100 \quad (5.3)$$

となる．この値はモータの効率も含むためポンプ効率より悪くなる．

測定結果

スラスト部に設けた動圧スパイラル溝の効果を調べるために，トロコイドギヤポンプの回転方向をスパイラル溝の傾きに対して，同一方向と逆方向のポンプ性能を比較する．Fig.5.7 に，トロコイドポンプの内側・外側ギヤと動圧スパイラル溝の相対位置を示す．スパイラル溝は内側ギヤの大きさにほぼ等しい大きさであり，ポンプの半時計方向(CCW)回転では，ポンプ・イン形の軸受として働き，時計方向(CW)回転でポンプ・アウト形の軸受として働くように構成する．

モータに 15 V 印加し，モータの回転方向によるポンプの H-Q 性能を測定する．その結果を Fig.5.8 に示す．次に条件を同じにするため，モータの回転数を 3000rpm に調整して，回転方向によるポンプ効率を確認する．その結果を Fig.5.9 に示す．尚，測定したデータは Table5.2 に示すが，参考に確認したスラスト部に動圧溝のないポンプの性能も示す．

考察

Fig.5.8 からは動圧スパイラル溝の回転方向の違いによるポンプ性能に明らかな違いが確認できる．CCW回転（ポンプ・イン軸受）にすると，CW回転（ポンプ・アウト軸受）に比べてポンプ出力が向上，流量と差圧がそれぞれ向上する．この結果からスラスト部のスパイラル溝がポンプ性能に影響を与えることがわかる．

ポンプ効率の測定に関しては，Fig.5.9 から，流量に依存してポンプ効率に変化することがわかる，流量の増加により（バルブの開度比率を高くする）ポンプ効率は高くなり，流量 100ml/min 付近で最大となる．ポンプ・イン形動圧スパイラル溝のポンプの場合，明らかに効率は向上している．トロコイドギヤとスラスト部の動圧溝で発生する圧力により，トロコイドギヤとスラスト部の損失が低減したと考えられる．

さらに，Table5.2 のデータによれば，溝なしのポンプ性能は，流量 100ml/min，3000rpm 時に，差圧は 43.8 kPa と大きな値を示した．ただ入力も必要で，効率は 6 % になる．ポンプ・イン形のスパイラル動圧溝を設けた場合に示した効率 8.1% に対しては悪くなる．

この結果からスパイラル溝により，損失は低減するが，トロコイドポンプ内で昇圧した圧力がスラスト部に逃げたのではと考えられる．ただ，ポンプ効率の面から考えると，動圧効果を利用して，損失を低減することで，効率向上が期待できる．

5.3 スラスト動圧溝の効果

5.3.1 発生圧力

ここで、スラスト部に設けた動圧溝の発生する圧力を考える。通常軸受として作用するスラスト動圧軸受は単なる円形状であるが、トロコイドギヤポンプの場合は、回転体の外形がトロコイド曲線という複雑な形状である。そこで、任意形状の動圧発生力を計算できる動圧グループ軸受汎用性能解析プログラムを活用する^[26]。

このプログラムは、動圧グループ軸受に対する近似理論である無限溝数理論（Narrow Groove theory : NGT）^[27]を用い、さらに、要素に出入りする流量を差分近似して流量保存式を立てる Divergence Formulation(DF)^[28]法によって、任意形状をした潤滑面を取り扱うことができるプログラムである。出力される軸受特性は負荷容量、トルク等の静特性、半径方向の弾性係数、減衰係数およびモーメント弾性係数、減衰係数。その他、圧力分布の出力、軸方向の負荷容量を設定された値にするような軸の変位量を計算することも可能となっている。

5.3.2 スパイラル軸受の計算結果

Fig.5.5 の寸法緒元のスパイラル軸受で、回転数 3000rpm 時の動圧軸受の内外半径で発生する圧力をプログラムにより見積る。スラスト隙間をパラメータにした結果を Fig.5.10 に表す。トロコイド部で発生する圧力が 30kPa に対して、100k Pa 以上の圧力差が発生しており、十分軸受として動作していることがわかる。

5.4 結言

本章では、実際に小形トロコイドギヤポンプを製作してその性能を測定した。トロコイドギヤポンプは、部品点数も少なく簡素な構造であるが、摺動部が多いため摺動による損失が大きく、効率があまり良くない。特に小形になると、サイズダウンに対して、部品の加工精度も比例して向上すれば問題ないが、現実には加工精度に限界があるため、どうしても損失が増加する。また、小形化で出力が取れないため、損失分が出力に対して大きくなってしまふなどの問題がある。この損失を低減する手法として、通常の軸受で使用する動圧効果を利用できないかと考えた。結果的には、動圧溝を設けたことにより、トロコイドギヤのスラスト面の摺動抵抗が低減し、モータ効率の向上を確認できた。

今後、小形トロコイドギヤポンプの実用化にあたっては、損失低減に効果のあった動圧溝をケース部に設けるだけでなく、内側ギヤの回転によりフリーに回転する外側ギヤの外周面への動圧溝加工も有効と考えられる。ただ注意しなくてはならないのは、ポンプ部で発生する圧力との干渉など、トロコイド部で発生した圧力が動圧溝へ漏れることがないようにする必要がある。



Fig.5.1 Appearance of prototype trochoid gear pump

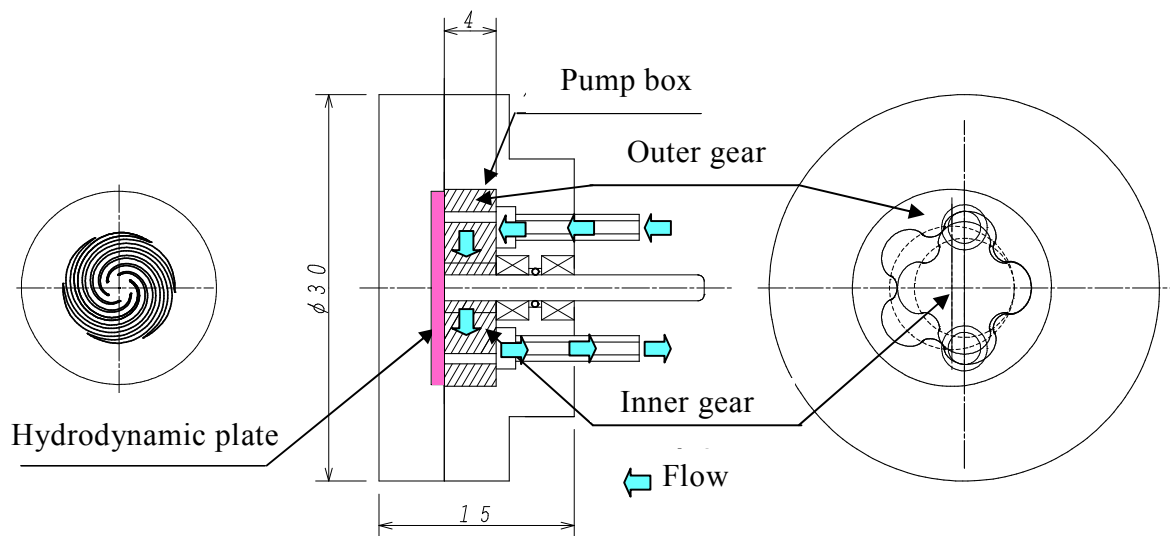


Fig.5.2 Cross-sectional structure of prototype trochoid gear pump

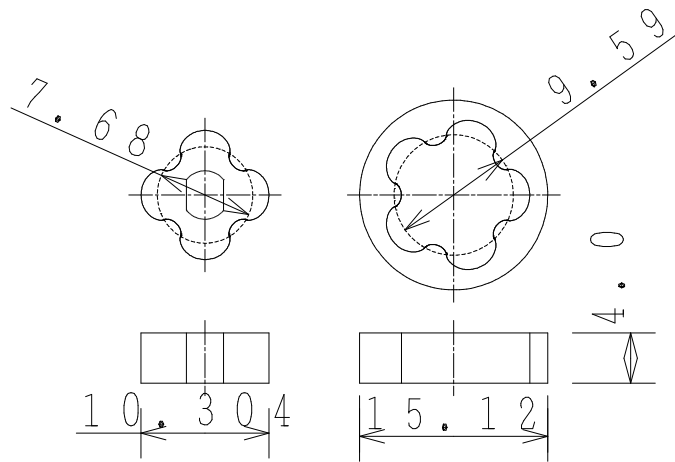


Fig.5.3 Appearance and size of prototype trochoid gear parts

Table5.1 Specifications of prototype trochoid gear

Item	Inner gear	Outer gear
Teeth number	4	5
Base circle diameter(mm)	7. 68	9. 59
Epicycloid rolling circle diameter(mm)	1. 3142	1. 3324
Hypocycloid rolling circle diameter(mm)	0. 6058	0. 5856

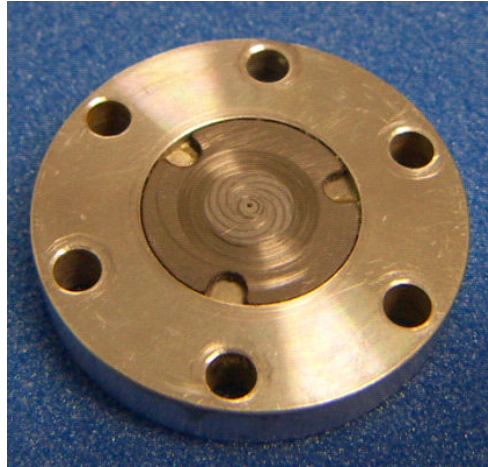


Fig.5.4 Hydrodynamic grooved plate

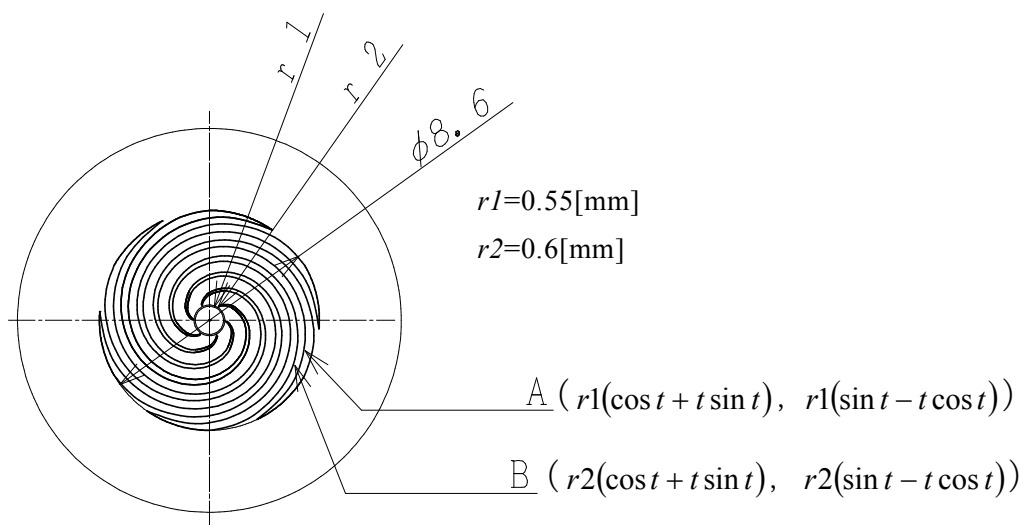


Fig.5.5 Spiral grooved bearing

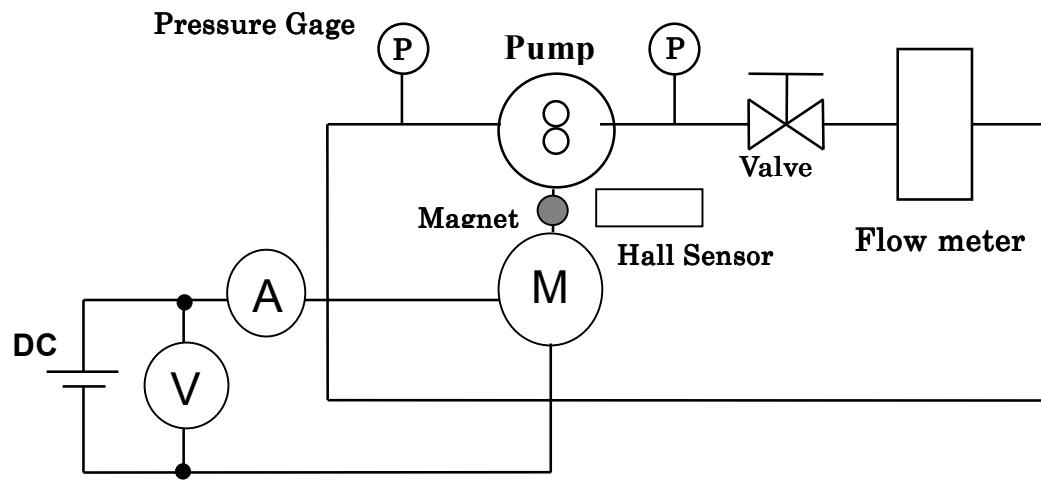


Fig.5.6 Experimental setup

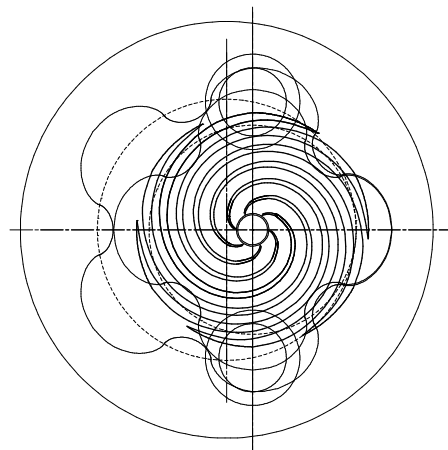


Fig.5.7 Relative position of trochoid gear and spiral groove

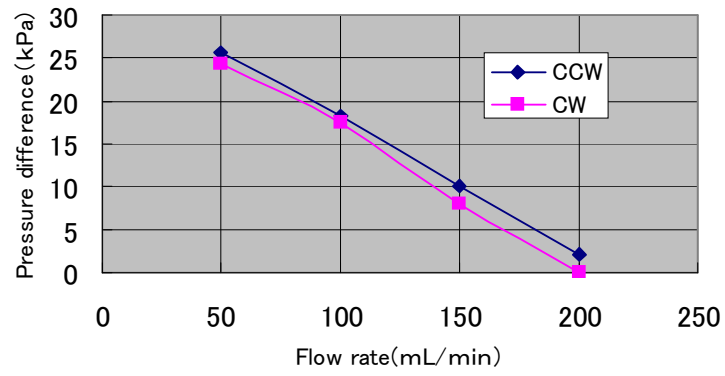


Fig.5.8 H-Q characteristics at D.C.15V

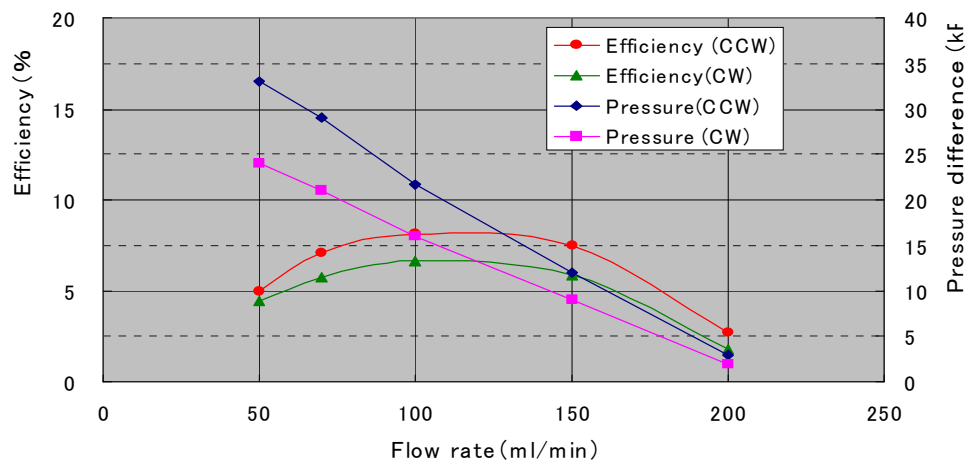


Fig.5.9 Efficiency vs. flow rate at 3000rpm

Table.5.2 Measurement data of prototype trochoid gear pump

Rotary direction	Voltage	Current	Flow rate	Pressure difference	Speed	Electrical input	Load	Pump Input	Pump output	Pump efficiency	Total efficiency
	V	mA	mL/min	kPa	rpm	W	mNm	W	W	%	%
CCW (From axis)	17.0	71.5	50	33	3000	1.212	1.761	0.553	0.027	5.0	2.3
	16.3	65.3	70	29	3000	1.064	1.521	0.478	0.034	7.1	3.2
	16.4	62.7	100	21.7	3000	1.028	1.420	0.446	0.036	8.1	3.5
	15.8	59.0	150	12	3000	0.935	1.277	0.401	0.030	7.5	3.2
	15.0	56.0	200	3	3000	0.840	1.161	0.365	0.010	2.7	1.2
CW (From axis)	15.4	63.0	50	24	3000	0.970	1.432	0.450	0.020	4.4	2.1
	15.0	61.0	70	21	3000	0.915	1.355	0.426	0.024	5.8	2.7
	14.5	59.0	100	16	3000	0.856	1.277	0.401	0.027	6.6	3.1
	14.0	57.5	150	9	3000	0.805	1.219	0.383	0.022	5.9	2.8
	13.5	56.0	200	2	3000	0.756	1.161	0.365	0.007	1.8	0.9
Non grooved	18.3	126.0	100	43.8	3000	2.306	3.870	1.216	0.073	6.0	3.2

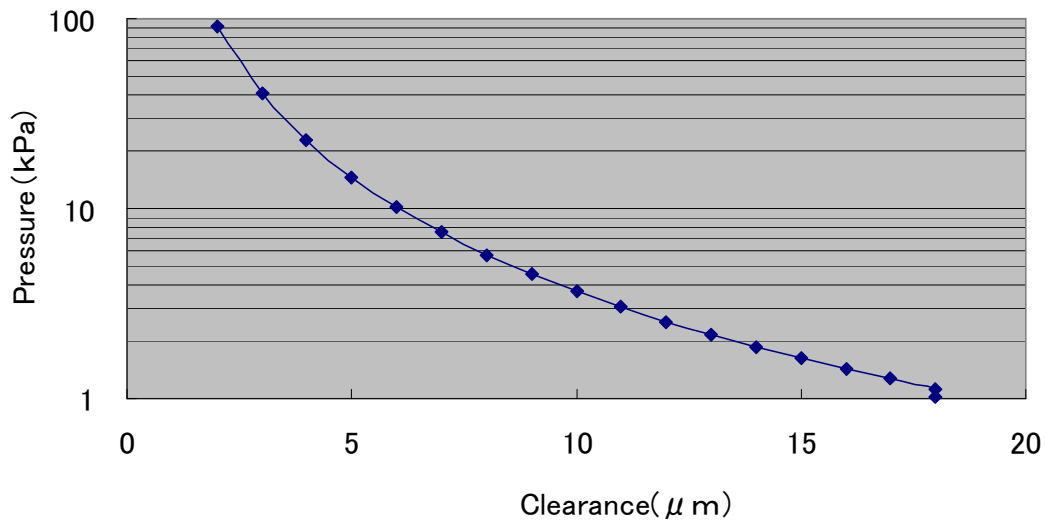


Fig.5.10 Pressure vs. Clearance

第 6 章

結論

本研究は，トロコイドギヤポンプの小形化，効率向上技術開発の一貫として，内接形トロコイドギヤポンプの基本特性を支配する内部流動の可視化を行った．本研究はカリロスコープ粒子と呼ばれる特殊な可視化用流動流体が，狭い隙間を流れる流体の流れを観測するのに有効な手段であることを示した．次にこの可視化トレーサを用いた流動解析を行い，トロコイドギヤポンプの内部流動の解明を試みた．第 3 章で，カリロスコープというものを明らかにし，その特徴を知るための T-C flow 試験を行った．第 4 章では，実際にカリロスコープ粒子を用いたトロコイドギヤポンプ内の流動場の計測を行い，その流動特性について説明を行った．第 5 章では，実用化を試みて実際に小形ポンプを製作して性能を確認した．その際，ポンプの一部に動圧軸受を内蔵するという試みにチャレンジした．

本研究の主な総括を以下に示す．

カリロスコープ粒子を用いた流れの可視化

カリロスコープ粒子と呼ばれる特殊なトレーサの特性を明らかにする．カリロスコープ粒子の可視化実験自体の前例が少なく，カリロスコープ粒子によって得られる画像と，流動の関係の詳細は明らかになっていない．そこで，トーショナルクエット流を用いたカリロスコープ粒子のキャリブレーション試験装置を製作して，カリロスコープ粒子で観察される輝度と流動の関係を調べた．

- 顕微鏡を用いた計測と実験結果から，カリロスコープ粒子が板状の微粒子であり，表面は乱反射でなく，鏡面反射をする．
- カリロスコープ粒子はその形状により，せん断ひずみ速度方向に配向し，その結果反射光の輝度に変化する．輝度は投影面積が広いほどその値が大きくなり，狭いほど輝度が小さくなる．このことにより，これまで推論であったカリロスコープ粒子の反射光はひずみ速度方向によって変わることが確認された．
- T-C flow を用いた手法でカリロスコープ画像情報の定量化を検討したが，浅い領域

のカリロスコープ粒子の配向の影響が輝度に対し支配的であり、定量的な解析は困難であることがわかった。

カリロスコープ粒子を用いたポンプ内の流動場の計測

カリロスコープ粒子を作動流体として用いてトロコイドギヤポンプ内の流動構造の解明に取り組んだ。

- 摺動部およびギヤ接触部を含むような容積形のポンプでは、カリロスコープ粒子は可視化のトレーサとして有効であることがわかった。今回、トロコイドギヤポンプにおける内部のせん断や渦、乱れなどを定性的に把握するためには十分な画像品質を確認できた。球状のトレーサ粒子などが入り込めないような、狭い領域を流れる流体の観測には有効な手段である。
- トロコイドギヤポンプについては、可視化モデルを用いることにより、数値解析ではわからないような領域の特性についての知見が得られた。具体的には、内外2つのギヤの間隙に形成される密閉室が回転し、かつ顕著な変形を伴う時、カリロスコープ粒子の観察画像を統計処理することにより、 $Re=1600\sim 2000$ 付近で、cycle by cycle instability（非周期的な不安定性）が発生し、流動の規則性が大きく崩壊し乱流化している。ここを境にポンプの性能が大きく低下していると考えられる。
- この高 Re 数における乱流化の主要因がギヤのクリアランス部から上流に向けて逆流する噴流であることがわかった。

トロコイドポンプへの動圧軸受

- トロコイドポンプの一部に動圧軸受を構成することで、機械的な損失が低減、ポンプ効率が向上することがわかった。小形化にあたっては、損失をいかに低減させるかが問題である。動圧効果の活用でトロコイドギヤポンプの効率が向上する可能性を見出した。

参考文献

- [1] 村田暹, “トロコイド形流体機械(その1)”, ターボ機械, 22 巻, 10 号, (1994) pp58-63
- [2] 村田暹, “トロコイド形流体機械(その2)”, ターボ機械, 23 巻, 2 号, (1995) pp61-66
- [3] 村田暹, “トロコイド形流体機械(その3)”, ターボ機械, 23 巻, 3 号, (1995) pp61-65
- [4] 村田暹, “トロコイド形流体機械(その4)”, ターボ機械, 23 巻, 4 号, (1995) pp56-62
- [5] 村田暹, “トロコイド形流体機械(その5)”, ターボ機械, 23 巻, 5 号, (1995) pp64-68
- [6] Gamez-Montero, C. Macia, “Fluid Dynamic Behaviour of an Internal Rotary Pump Generated by Trochoidal Profiles”, Proc. of 1st FPNI-phD Symp. Hamburg, (2000) pp33-47
- [7] 鈴森康一, 古澤宏明, 神田岳文, 山田嘉昭, 永田卓志, “電磁アクチュエータ一体型マイクロリニアポンプ”, 電学論 E, 125 巻, 第 12 号, (2005) pp461-466
- [8] 山田嘉昭, “マイクロ T A S 用マイクロポンプ”, 油空圧技術, 42, 6, (2003) pp12-16
- [9] 原田武, 佐々木康彦, 河野顕臣, “高出力マイクロポンプの開発”, 電子情報通信学会論文誌 C-II, Vol. J82-C-II, No. 10, (1999) pp551-556
- [10] 村井祐一, 宮城直樹, 宮崎孝司, 山本富士夫, “レイノルズ数域におけるトロコイドギアポンプの内部流動”, 日本機械学会論文集 (B 偏), Vol. 70, (2003) pp104-111
- [11] 井上雅弘, 鎌田好久, “流体機械の基礎”, コロナ社, (1989)
- [12] 伊東英覚, 本田陸” 流体力学”, 丸善株式会社, (1981)
- [13] Shung, J.B., Pennock, G. R.: The direct contact problem in a trochoidal-type machine, Mechanism and Machine Theory, Vol. 29, (1994) pp673-689

- [14] 可視化情報学会編, “PIV ハンドブック”, 森北出版株式会社, (2002)
- [15] 流れの可視化学会編, “流れの可視化ハンドブック”, 朝倉書店, (1977)
- [16] Matisse, P., Gorman, M. “ Neutrally buoyant anisotropic particles for flow visualization”, Phys. Fluids, Vol.27 (1984) pp759-760.
- [17] Dominguez-Lerma, M. A., Ahlers, G., Cannell, D. S. “Effects of Kalliroscope flow visualization particles on rotating Couette-Taylor flow”, Phys. Fluids, Vol.28 (1985) pp1204-1206.
- [18] Kwangjai Park, Gerald L. Crawford, and Russell J. Donnelly, “Determination of Transition in Couette Flow in Finite Geometries”, Physical Review Letters, Vol. 47, No.20, (1981), pp1448-1450
- [19] G.Gauthier, P.Gondret, and M. Rabaud, “Motions of anisotropic particles: Application of three-dimensional flows”, Phys. Fluids, Vol.10, No.9, Sept 1998, pp2147-2154
- [20] Thoroddsen, S.T., Bauer J.M. “Qualitative flow visualization using colored lights and reflective flakes”, Phys. Fluids, Vol.11, (1999) pp1702-1704
- [21] Sumita, I., Olson, P. “Laboratory experiments on high Rayleigh number thermal convection in a rapidly rotating hemispherical shell”, Phys. Earth Planetary Interiors, Vol.117, (2000) pp153-170
- [22] Hu, D. L., Mendel, L. Chan, B., Goreau, T., Bush, J. W. M. “Visualization of a fish wake using tobacco mosaic virus”, Phys. Fluids, Vol.17, 091103, (2003) pp1-1
- [23] Prigent, A., Gregoire, G., Chate H., Dauchot, O. “Long-wave length modulation of turbulent shear flows”, Physica D, Vol.174, (2003) pp100-113

[24] Noui-Mehidi, M.N. “Effect of acceleration on transition properties in a conical cylinder system”, Exp. Thermal and Fluid Sci., Vol.29, (2005) pp447-456

[25] 十合晋一, “気体軸受－設計から製作まで－, 共立出版株式会社, (1984)

[26] 川端信義, “境界適合座標系を用いた潤滑流れ計算のはん用化に関する研究(第1報, DF法の基礎式と非圧縮性流体の場合)”, 日本機械学会論文集(C編) 53巻 494号, (1987), pp2155-2160

[27] Vohr. J.H. and Chow.C.Y.: Characteristics of Herringbone-Grooved, Gas-Lubricated Journal Bearings, Trans. ASME, Ser.D, 87-3, (1965) pp568-578

[28] V.Castelli & J.Pirvics, “Review of Numerical Methods in Gas Bearing Film Analysis, ASME Journal of Lubrication Technology, 90 (1968) pp777-792

謝辞

本研究及び本論文の完成のために、多くの方々のご指導・ご協力を頂き、誠にありがとうございます。

本研究の御指導・御助言を賜りました、山本富士夫名誉教授、川端信義教授、鈴木崇夫助教授、現北海道大学の村井祐一助教授には、深く感謝します。山本名誉教授には、可視化から流体工学に関する指導にはじまり、実験の指導、論文作成のためのミーティングなどで本当にお世話になりました。川端教授には、動圧軸受をポンプという流体機器に適用するというアドバイスをいただき、研究の幅がひろがりました。鈴木崇夫助教授には、発表や論文でのアドバイスを感謝しております。村井助教授には、カリロスコープを紹介いただき、この論文の基礎の部分を作成いただいたことに感謝しております。また、実験を一緒に行った現ダイキン工業の上埜安隆氏には、社会人として、あまり学校に来ることができなかった私のため、時間にあわせて実験をしていただき、ありがとうございました。今回の研究のきっかけに始まり、その後もいろいろと面倒をみていただいたMATプレロマ(株)社長の宮城直樹氏に感謝します。さらに、いろいろとアドバイスをいただきました大岩浩司氏、東芝の内田竜朗氏、その他、たまにしか顔を出さないにもかかわらず、暖かく迎えてくださいました山本・鈴木研究室の多くの皆様に、深く感謝します。

会社に勤めながらでしたので、あまり時間がままなりませんでした。この研究室で若い皆様と一緒に過ごせたことは、いろいろと刺激になりました。今後もこの経験を生かして仕事に生かそうと思っています。

最後に、いろいろと協力してくれた家族に感謝します。

2007年3月

伊東哲也